

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

Automatic Estimation of Parameters of Soil Constitutive Models by Particle Swarm Optimization

酒井崇之¹, 中野正樹²

1 名古屋大学・大学院工学研究科・t-sakai@civil.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・大学院工学研究科

概 要

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。本研究では、粒子群最適化手法を改良した DMS-PSO を用い、修正 Cam-clay model および SYS Cam-clay model の材料定数を推定する手法を提案した。提案手法の妥当性を検討するため、1)正解が分かっている問題から正解が確実に得られるかどうか、2)実際の実験を再現する際に毎回同じパラメータが得られるかどうかを検討した。1)については、実験を2つ以上実施したり、パラメータの探索範囲を、物性値を基に限定したりすることにより、正解が確実に得られるようになる。2)についても、粒子の数を多めに取り、パラメータの範囲を限定することにより、100回の検討でほとんど同じパラメータが得られることがわかった。以上のことから、提案したパラメータの自動推定法は妥当であると判断した。

キーワード：粒子群最適化手法，構成則，データ同化

1. はじめに

多くの研究や設計において、有限要素法による解析が実施されている。有限要素法においては、搭載されている構成則のパラメータをどのように決定するかが、解析結果に大きく影響を及ぼす。また、有限要素法に限らず、多くの他の方法についても同様である。一般的に、土の構成則のパラメータの決定方法としては、ある供試体に対して実施した三軸圧縮試験や標準圧密試験から得られたデータと数値シミュレーションの結果を比較する方法が挙げられる。ほとんどの場合、数値シミュレーションが実験結果をよりよく再現されるように、試行錯誤しながら手作業でパラメータを変化させることにより、パラメータを決定する。ただし、研究者や設計者の熟練度によってパラメータが変わってしまう恐れがある。また、再現の度合いにおいては見た目で判定されており、定量的に評価していないことが多い。

これまで、このような逆解析と呼ばれる問題に対し、様々なアプローチがなされている。例えば遺伝的アルゴリズムを用いて実施した例¹⁻⁴⁾、粒子群最適化手法⁵⁾を用いた例⁶⁻⁹⁾、機械学習を用いた例が挙げられる^{10,11)}。これらの方法は、発見的手法に分類され、これまで多くの問題に適用されてきおり、方法をまとめた論文も存在する¹²⁾。一方で、これらの手法は計算コストが大きいことも指摘されて

いる¹³⁾。

本研究では、改良した粒子群最適化手法を用いた手法を用いて、修正 Cam-clay model¹⁴⁾および SYS Cam-clay model¹⁵⁾のパラメータを同定する方法を構築した。粒子群最適化手法の弱点として、局所解に陥りやすく、結果的に大域的な探索ができていない可能性がある問題が挙げられる。これらの問題を解決するべく、Liang and Suganthan(2005)¹⁶⁾の研究で提案された DMS-PSO を参考に、粒子群最適化手法を改良した。詳細は3章にて述べるが、これらの改良により、より効率よく解を探索することができ、計算コストを小さくできる。また、粒子群最適化手法において解の探索範囲を狭めることは、解の収束性や探索速度を向上させ、計算コストを低下させる上で非常に重要である。そこで我々は、粒度や液性限界や塑性限界、塑性指数といった物性値に着目した。実際の現場においても多くの場合、物性値を得るための物性試験を実施している。したがって、物性値を利用しない手はないと考える。また現場の設計においては、入手できる土は限られており、限られた実験試料に対し、どの試験を実施すべきか非常に重要な問題である。本研究では、どの試験を実施すると解が推定しやすいのかについても検討を行った。

土の構成モデルは、いくつかのパラメータを設定する必要があるため、実験結果が1つしかない場合、見た目には同じ程度の適合度であっても、異なるパラメータが得られ

る可能性があり、それは避けるべきである。そこで本研究では、以下の手順で手法の妥当性を検討した。

- 1) 正解が分かっている問題から正解が確実に得られるかどうか。
- 2) 実際の実験を再現する際に毎回同じパラメータが得られるかどうか。

1)により、提案手法の性能を検討することになる。1)で提案手法が良いと評価されたとしても、2)を保証していることにはならない。そこで、2)についても調査をした。

2. 本研究で対象とする問題について

2.1 提案手法の妥当性の検討

本報告では、圧密排水三軸圧縮試験、圧密非排水三軸圧縮試験と標準圧密試験を対象とする。正解パラメータを表1, 2に示す。これらのパラメータは、Nakai ら(2017)のAlluvial clayの値である¹⁷⁾。なお、PSOのパラメータと区別するため、限界状態定数を $\tilde{M}$ として、NCLの切片を $\tilde{N}$ とした。初期の拘束圧は20kPaで等方応力状態であるとし、初期の異方性はないものとした。図1~3は表1のパラメータで計算した結果となる。すなわちこれらは修正 Cam-clay model の計算結果であるため、練返し正規圧密土を想定した結果となる。図4~6は、表2のパラメータで計算した結果となる。すなわちSYS Cam-clay による乱れの少ない試料を想定した計算結果である。まず、図1~3で示した結果を提案手法により再現し、結果として表1のパラメータが得られるか検討し、修正 Cam-clay model に適用できるかを調べた。次に、図4~6で示した結果を提案手法により再現し、結果として表1のパラメータが得られるか検討し、SYS Cam-clay model に適用できるかを調べた。なお、SYS Cam-clay model については、修正 Cam-clay model のパラメータは既知、つまり固定値として、それ以外のパラメータを推定する。

表1 修正 Cam clay model のパラメータ

推定するパラメータ		
圧縮指数	λ	0.210
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.035
限界状態定数	$\tilde{M}$	1.500
NCL の切片 (98.1 kPa)	$\tilde{N}$	2.400
ポアソン比	N	0.300
初期比体積	e_0	1.734

表2 SYS Cam clay model のパラメータ

固定値		
圧縮指数	λ	0.210
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.035
限界状態定数	$\tilde{M}$	1.500
NCL の切片 (98.1 kPa)	$\tilde{N}$	2.400
ポアソン比	N	0.300
初期比体積	v_0	3.090
推定するパラメータ		
正規圧密土化指数	M	10.000
構造劣化指数	A	0.450
$\ D_s^p\ $ と $-D_s^p$ の比	c_s	0.300
回転硬化指数	b_r	0.010
回転硬化限界定数	m_b	1.000
初期過圧密比	R_0	0.025
初期構造	R_0^*	0.0075

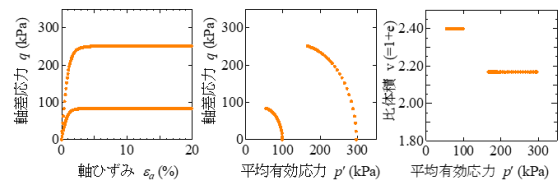


図1 表1のパラメータの非排水三軸圧縮試験の計算結果

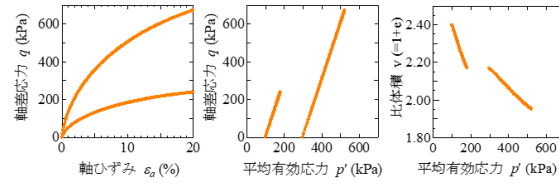


図2 表1のパラメータの排水三軸圧縮試験の計算結果

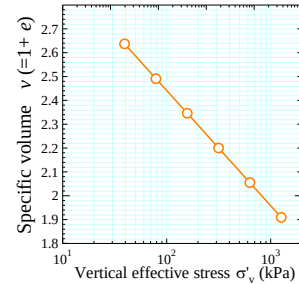


図3 表1のパラメータの標準圧密試験の計算結果

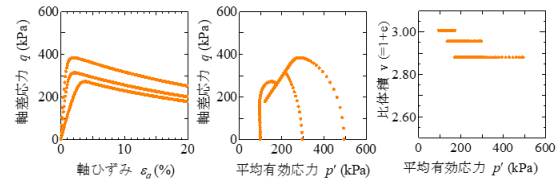


図4 表2のパラメータの非排水三軸圧縮試験の計算結果

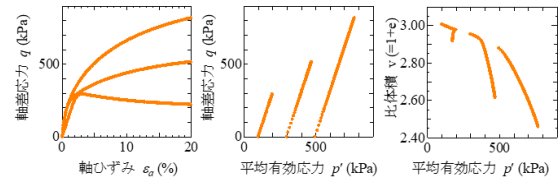


図5 表2のパラメータの排水三軸圧縮試験の計算結果

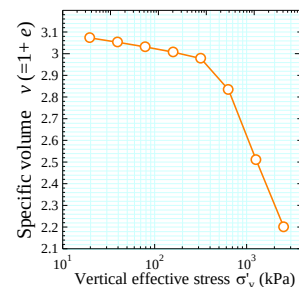


図6 表2のパラメータの標準圧密試験の計算結果

2.2 実際の実験結果の再現について

実際の実験結果を図7~10に示す。これらの結果はNakano et al (2005)のJoetsu clay に対して実施した試験結果である¹⁸⁾。図7, 8は、練返し正規圧密状態に対する試験結果である。図9, 10は乱れの少ない試料の試験結果である。なお、三軸圧縮試験においては、せん断時の比体積のみ示されていたため、せん断過程のみ再現した。

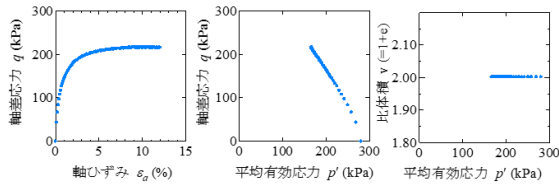


図7 Joetsu clay の正規圧密土の三軸圧縮試験の結果¹⁸⁾

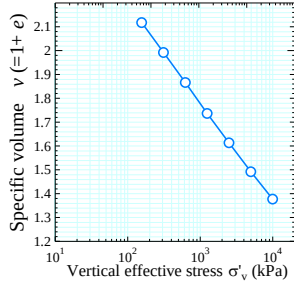


図8 Joetsu clay の正規圧密土の標準圧密試験の実験結果¹⁸⁾

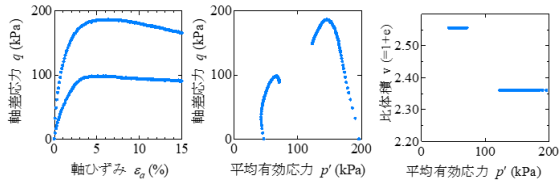


図9 Joetsu clay 乱れの少ない試料の三軸圧縮試験の結果¹⁸⁾

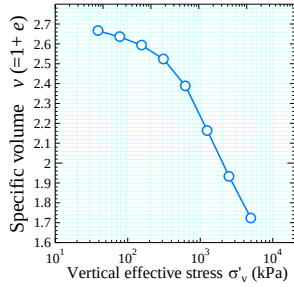


図10 Joetsu clay 乱れの少ない試料の標準圧密試験の結果¹⁸⁾

3. パラメータ自動取得方法の計算アルゴリズム

本章では、まず本研究の根幹となる PSO について説明をし、その後、パラメータ自動取得方法の計算フローチャート全体について説明を行う。

3.1 PSO の粒子位置更新式

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。本研究で用いた PSO は Liang and Suganthan(2005)¹⁶⁾ が提案した Dynamic multi-swarm PSO (以下 DMS-PSO) である。DMS-PSO では、N 個の粒子を M 個ずつ、J 個の島にわけ (N=J×M)。この時、粒子は必ず 1 つの島に振り分けられ、各島に振り分けられる粒子の数は同じである。DMS-PSO の世代数 t における i 番目の速度ベクトル $\mathbf{v}_i^t$ と位置ベクトル $\mathbf{x}_i^t$ の更新式は以下の通りである。

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = w\mathbf{v}_i^t + c_1 r_1 (\mathbf{pbest}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_2 r_2 (\mathbf{lbest}_j^t - \mathbf{x}_i^t) \quad (1)$$

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

$$\mathbf{x}_i^t = \begin{Bmatrix} \tilde{\lambda}_i^t \\ \tilde{\kappa}_i^t \\ \tilde{M}_i^t \\ \tilde{v}_i^t \\ \tilde{e}_i^t \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{v}_i^t = \begin{Bmatrix} \Delta \tilde{\lambda}_i^t \\ \Delta \tilde{\kappa}_i^t \\ \Delta \tilde{M}_i^t \\ \Delta \tilde{v}_i^t \\ \Delta \tilde{e}_i^t \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_i^t = \begin{Bmatrix} a_i^t \\ m_i^t \\ c_{si}^t \\ b_{ri}^t \\ m_{bi}^t \\ R_i^t \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{v}_i^t = \begin{Bmatrix} \Delta a_i^t \\ \Delta m_i^t \\ \Delta c_{si}^t \\ \Delta b_{ri}^t \\ \Delta m_{bi}^t \\ \Delta R_i^t \end{Bmatrix} \quad (4)$$

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。式(3)は修正 Cam-clay model のときの位置ベクトルと速度ベクトルの成分を示しており、式(4)は SYS Cam-clay model のときの位置ベクトルと速度ベクトルの成分を示している。式(3)、式(4)と表 1, 2 から分かる通り、各ベクトルの成分は、構成則のパラメータから構成される。 $\mathbf{pbest}_i^t$ 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時の位置ベクトルである。つまり、粒子 i の実験結果と計算結果がこれまでで最も近づいた時のパラメータ群である。 $\mathbf{lbest}_j^t$ 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時の位置ベクトルを示す。つまりグループ j 内において実験結果と計算結果がこれまでで最も近づいた時のパラメータ群である。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、DMS-PSO においては、 $\mathbf{lbest}_j^t$ の情報を残しつつ計算を進めるが、本手法においては、グループの振り分け直しをするたびに $\mathbf{lbest}_j^t$ をリセットした。これにより DMS-PSO と比較してさらに収束しづらくなるが、一方で、大域的に探索されることが期待できる。

c_1, c_2, w は粒子群最適化法のパラメータである。 c_1 が大きくなると、その粒子は $\mathbf{pbest}_i^t$ に引き寄せられやすくなる。このことから、粒子自身の情報を重要視することを示している。 c_2 が大きくなると、その粒子は $\mathbf{lbest}_j^t$ に引き寄せられやすくなる。このことから、群の情報を重要視することを示している。 w は慣性パラメータであり、この値が大きくなると粒子の速度はどんどん大きくなることから、大域的な探索が可能となるが収束しづらくなる。一方、 w が小さいときは、粒子の速度は小さくなっていくため、局所的な探索が可能であるが、局所解に陥りやすくなる。一般的に c_1, c_2 は 1 に近い値、 w は 0.8 や 0.9 を用いる¹⁹⁾。本研究では、 $c_1 = c_2 = w = 0.9$ を用いた。 r_1, r_2 は 0~1 の乱数が代入される。

3.2 計算のフローチャート

図 11 に本研究で用いたフローチャートを示す。それぞれ説明していく。1) 粒子の配置方法、2) 粒子の評価方法(目的関数の設定)、3) 粒子の初期化の方法の順に説明する。な

お、図 11 において赤字で示している数字は、自由に設定できるパラメータであり、ハイパーパラメータにあたる。

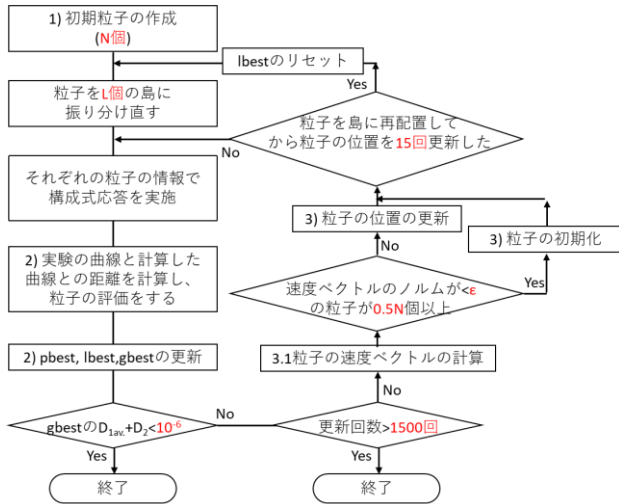


図 11 提案手法のフローチャート

1) 粒子の配置方法について

初期の粒子は N 個用意する。粒子の情報については、式 (3)、式 (4) に示した通りである。4 章で示すパラメータの範囲内で一様乱数を発生させて、各粒子が最初に持っている情報を決定する。なお、式 (3) には正規圧密線の切片 N がないが、以下の式から得られるため、推定する必要がない。

$$v_0 = \tilde{N} + (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) \ln \left(\frac{\tilde{M}^2 - \eta_0^2}{\tilde{M}^2} \right) - \tilde{\lambda} \ln p' \quad (5)$$

ここで、 $\eta_0 (= q_0/p'_0)$ は初期応力比、 q_0 は初期軸差応力、 p'_0 は初期平均有効応力である。 v_0 は初期比体積である。また、式 (4) には初期構造 R_0^* がないが、以下の式から他のパラメータが分かっているため、推定する必要がない。

$$\frac{1}{R_0^*} = \frac{1}{R_0} \exp \left\{ -\frac{\tilde{N} - v_0 - \tilde{\lambda} \ln p'_0}{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}} + \ln \left(\frac{\tilde{M}^2 + (\eta_0 - \zeta_0)^2}{\tilde{M}^2} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで、 R_0 は初期過圧密、 ζ_0 は初期異方性である。

初期の速度ベクトルの成分は全て 0 とする。また、粒子を L 個の島に分けるが、これもランダムに決定した。なお世代数 15 回ごとに粒子を島に振り分け直す。常にランダムに振り分ける。また島を振り分けた際に $lbest_i^t$ はリセットされる。ここは DMS-PSO との相違点となる。 $lbest_i^t$ をリセットすることにより、収束性は悪くなるが、局所解から脱出できる可能性が高くなる。

2) 粒子の評価方法（目的関数の設定）

目的関数をどのように設定するかは、このような問題において重要なポイントの 1 つである。本問題においては、実験結果と計算結果が近ければ近いほど粒子の評価が高いということは自明である。多くの場合は、荷重－変位関係や、応力－ひずみ関係で評価している。また、非排水せん断においては、過剰間隙水圧－ひずみ関係も考慮することもある。

本研究では、 v - p' - q 空間で目的関数を設定する。ここで、 v は比体積、 p' は平均有効応力、 q は軸差応力である。ただ

し、そのまま v - p' - q 空間で評価してしまうと、例えば、異なる拘束圧で実験をしたときに、拘束圧が大きい実験結果の方が、 p' や q の値が大きいため、誤差が大きくなる恐れがある。また、同じ拘束圧だとしても、密度が大きい場合、 q が大きくなるため、密度が大きい土の方が結果に及ぼす影響が大きくなる恐れがある。そこで、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 は式 (7)～(9) で定義される。ここで、添え字 k は k 番目の実験という意味である。例えば、三軸圧縮試験を拘束 100, 300 kPa で実施していた場合、100 kPa を 1 番目、300 kPa を 2 番目とし、それぞれの場合で 3 つの軸 $R_k^{p'}$ 、 R_k^q 、 R_k^v を定義する。

$$R_k^{p'} = \frac{p' - p'_{kexpmin}}{p'_{kexpmax} - p'_{kexpmin}} \quad (7)$$

$$R_k^q = \frac{q - q_{kexpmin}}{q_{kexpmax} - q_{kexpmin}} \quad (8)$$

$$R_k^v = \frac{v - v_{kexpmin}}{v_{kexpmax} - v_{kexpmin}} \quad (9)$$

$p'_{kexpmax}$ 、 $p'_{kexpmin}$ 、 $q_{kexpmax}$ 、 $q_{kexpmin}$ 、 $v_{kexpmax}$ 、 $v_{kexpmin}$ は、 k 番目の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。実験ごとに空間を定義することで、実験が様々な条件で行われたり、供試体が異なったりしても、それぞれの実験結果を同じように評価することができる考えた。

目的関数は以下の通り設定される。

$$U(x_i^t) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{(R_{lcalc,k}^{p'} - R_{lexp,k}^{p'})^2 + (R_{lcalc,k}^q - R_{lexp,k}^q)^2 + (R_{lcalc,k}^v - R_{lexp,k}^v)^2}}{KL} \quad (10)$$

$R_{lcalc,k}^{p'}$ 、 $R_{lcalc,k}^q$ 、 $R_{lcalc,k}^v$ 、 $R_{lexp,k}^{p'}$ 、 $R_{lexp,k}^q$ 、 $R_{lexp,k}^v$ はそれぞれ $R_k^{p'}$ - R_k^q - R_k^v 空間内における計算結果 (calc) と実験結果 (exp) である。 L はデータの個数であり、せん断ひずみ $X\%$ ごとにデータの比較し、 $\varepsilon_{fin} \%$ まで試験を実施すると、 $L = \varepsilon_{fin}/X$ となる（例えば、せん断ひずみ 20% まで試験を実施しており、0.1% ごとに結果を取得すれば、 $L=200$ 個となる）。 K は全体の実験の個数を示す。

つまり、 k 番目の実験の l 番目のデータについて、 $R_k^{p'}$ - R_k^q - R_k^v 空間内における実験結果と計算結果の差を計算する。式 (10) の分子からも分かる通り、この差は実験結果と計算結果の距離である。そして、それを足し合わせて KL で除したものが目的関数になる。 KL はデータの総数を示しているから、 KL で除することにより、実験データ数や実験数に依らず同じスケールで評価できる。 $U(x_i^t) = 0$ 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、 $U(x_i^t)$ 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、 $U(gbest^t)$ が 1.0×10^{-6} より小さいと、パラメータを少数第 5 位まで推定できることが予備計算から分かっているため、その場合、計算を打ち切った。なお、圧密試験についても、同様の空間で評価するが、2 章で示した通り段階的荷重における圧密試験を想定しているため、 $R_{lcalc,k}^v$ と $R_{lexp,k}^v$ の差のみを用いて評価する。

世代数 $t+1$ において $U(x_i^{t+1}) < U(pbest_i^t)$ 、 $U(x_i^{t+1}) <$

$U(lbest_i^t)$, $U(x_i^{t+1}) < U(gbest^t)$ であるとき, $pbest_i^{t+1} = x_i^{t+1}$, $lbest_k^{t+1} = x_i^{t+1}$, $gbest^{t+1} = x_i^{t+1}$ として, それぞれの粒子の自己ベスト, 島内でのベスト, 粒子全体でのベストの位置ベクトルを更新する。

3) 粒子の位置更新

式(1)より各粒子の速度ベクトルを得ることができる。そして, 通常は, 式(2)に式(1)を代入することにより, 粒子の位置を更新する。この際, 探索範囲(詳細は4章で示す)を超えてしまった場合, 強制的に範囲内に戻す操作をした。この際, 探索範囲内の最大値を超えたら, 最大値, 探索範囲内の最小値を下回ったら最小値になるようにしており, 速度ベクトルの値も $v_i^{t+1} = x_i^{t+1} - x_i^t$ により再計算している。

一方で, PSOの弱点として局所解に陥ってしまい, 粒子が動かないため, それ以上探索できなくなることが挙げられる。DMS-PSOに倣い粒子が局所解に陥ったと判定されたときに局所探索粒子と大域探索粒子をそれぞれ再配置する。粒子が局所解に陥ったと判定する方法として, 本研究では, 速度ベクトルのノルム $\|v_i^t\|$ に着目する。局所解に陥ったとき, $pbest_i^t = x_i^t$, $lbest_j^t = x_i^t$ となっているため, $\|v_i^t\| = 0$ となっており, 判定するのに都合が良い。本研究では, 全粒子の80%が $\|v_i^t\| < \varepsilon$ となったときに, 局所解に陥ったと判定して, 全粒子の50%を局所探索粒子に, 残りの50%を大域探索粒子に分けて再配置する。大域探索粒子については, 1)で示した方法, つまり初期に配置した方法と同じ方法で配置を行った。局所探索粒子については, $gbest^t$ 近傍に再配置する。正解値と推定値の差は, 目的関数 $U(x_i^t)$ が小さくなればなるほど, 小さくなる。そこで, 式(11)のように粒子を再配置する。なお, 再配置したときの速度ベクトルの成分はすべて0とした。

$$x_i^t = \{1 + rU(gbest^t)\}gbest^t \quad (11)$$

ここで, r は-1.0~1.0の範囲の乱数である。

4. 提案手法の妥当性の検討

表3に修正 Cam-clay model のパラメータ推定における検討ケースを示す。表3には検討結果も併せて示す。粒子の数については, 200,800個の2ケース実施した。いずれも島数は20個である。実験については, 圧密非排水三軸圧縮試験(CUB)と圧密排水三軸圧縮試験(CD)と標準圧密試験を考える。また, 実験を1つしか実施しなかった場合と, 2つ実施した場合のパラメータ推定精度の違いも検証する。1つは拘束圧100kPaの三軸圧縮試験とし, もう1つは拘束圧300kPaの三軸圧縮試験か, 標準圧密試験を実施した場合について検討した。最後に, パラメータ推定範囲の影響も調べるため, 表4に示す2つのパラメータ推定範囲で検討をした。狭い場合については, 液性限界や塑性限界のデータから範囲を推定する方法を提案する。Giasiら(2002)²⁰⁾やNakaseら(1988)²¹⁾やTiwari and Ajmera(2011)²²⁾の研究で液性限界 w_L や塑性指数 I_p から様々な λ や κ の推定式がまとめられている。これらの式に $w_L=97.4\%$, $I_p=54.1$

を代入して $\tilde{\lambda}$ と $\tilde{\kappa}$ の範囲を設定した。なお, これらの物性値については, Nakaiら(2017)の Alluvial clay の値を用いている。4章における妥当性の検討においても, 同論文における Alluvial clay の弾塑性パラメータを用いた。限界状態定数 $\tilde{M}$ については, Nakaiら(2017)の Alluvial clay においては $\tilde{M}=1.5$ であった。正規圧密土のせん断試験において限界状態に至っていれば, 限界状態定数をある程度推定することが可能である。ここでは, ± 0.05 の範囲で推定できると判断し, 範囲を設定した。ポアソン比 ν と間隙比 e については, 物性値から範囲を推定する根拠が乏しかったため, 狭い場合も広い場合も推定範囲を同じとした。

粒子群最適化法は, 乱数を随所に使っていることから, ランダム性が高い。そのため, 各ケース100回計算を実施して, 妥当性を検討した。局所解に陥ったかどうか判定するパラメータは $\varepsilon = 10^{-5}$ とした。

表3 検討ケース(修正 Cam-clay model)

case	1	2	3	4	5	6	7	8
粒子の数	200	800	200	800	200	800	200	800
実施実験	CUB 100kPa				CD 100kPa			
推定範囲	狭い		広い		狭い		広い	
N_s	88	99	89	99	99	100	99	100
Av.	887	482	893	487	656	382	692	420
Std.	315	200	306	162	155	24	140	52
Case	9	10	11	12	13	14	15	16
粒子の数	200	800	200	800	200	800	200	800
実施実験	CUB 100, 300kPa				CD 100, 300kPa			
推定範囲	狭い		広い		狭い		広い	
N_s	100	100	100	100	100	100	100	100
Av.	319	233	556	260	331	282	426	308
Std.	17	12	114	15	19	16	23	14
Case	17	18	19	20	21	22	23	24
粒子の数	200	800	200	800	200	800	200	800
実施実験	CUB 100kPa, OED				CD 100kPa, OED			
推定範囲	狭い		広い		狭い		広い	
N_s	100	100	100	100	100	100	100	100
Av.	297	224	326	245	232	243	355	268
Std.	18	14	19	13	12	15	20	13

表4 パラメータの推定範囲

	$\tilde{\lambda}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{M}$	N	e
狭い	0.177-0.380	0.026-0.069	1.45-1.55	0.01-0.49	1.709-1.759
広い	0.030-0.400	0.001-0.070	1.00-2.00	0.01-0.49	1.709-1.759

図12に正解と推定値の差と $U(gbest^t)$ の関係を示す。図12はCase10の70回目の検討の時であるが, 他の場合も同様の傾向となった。図から, $U(gbest^t) < 10^{-6}$ であれば十分にパラメータの推定ができていると考えた。そこで, 100回中 $U(gbest^t) < 10^{-6}$ になった回数 N_s や, $U(gbest^t) < 10^{-6}$ になるまでの世代数の平均値 Av. や世代数の標準偏差 Std. を用いて各ケースの比較を行う。

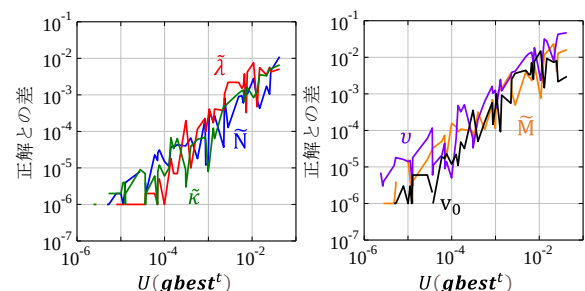


図12 推定値と正解の差と $U(gbest^t)$ の関係

表 3 から実験が 1 つの場合(Case 1~8), N_s が 100 になっていない場合(ハッチしていないケース)もあり, 必ずパラメータの推定ができていない。一方, 実験が 2 個のケース(Case 9~24) は, 粒子の数や, 推定範囲に依らず, N_s が 100 であり, パラメータの推定が必ずできている。パラメータの推定の際は, 実験を 2 種類実施した方が良いことを示唆している。なお, 非排水せん断と排水せん断に有意な差は見られなかった。パラメータの推定範囲に着目すると, case 9 と case 11 の比較から, パラメータの推定にかかる世代数の平均 $Av.$ や標準偏差 $Std.$ がパラメータ推定範囲の狭い方が小さい。このことからパラメータ推定範囲が狭い方が, 速くかつ安定的に計算できることがわかる。なお, 粒子数が 800 個の場合は, 推定範囲に依らず $Av.$ や $Std.$ が変わらないことから, 範囲を絞らなくても安定して推定できている。なお, 1 回推定するまでにかかる速度は, 一般的なパソコンを用いて粒子が 800 個で 30 分程度, 粒子が 200 個の場合は 8 分程度あることから, 通常は粒子を 800 個用いた方が良い。

表 5 に SYS Cam-clay model のパラメータ推定における検討ケースを示す。表 5 には検討結果も併せて示す。粒子の数については, 800 個の 2 ケース実施した。いずれも島の数 20 個である。実験については, 圧密非排水三軸圧縮試験(CUB)と圧密排水三軸圧縮試験(CD)と標準圧密試験(OED)を考える。また, 実施した実験数がパラメータ推定精度に与える影響も検証する。Case 1 から Case 6 はそれぞれ拘束圧 100, 300, 500kPa のいずれか 1 つで試験を実施したときである。拘束圧 100kPa は過圧密状態, 300kPa は圧密降伏応力付近, 500kPa は正規圧密状態における試験となる。Case 7~Case 12 は, 三軸圧縮試験を 100,300,500kPa の中でいずれか 2 つのみ実施できた場合である。Case 13, 14 は, 三軸圧縮試験を 3 つ実施した場合である。Case 15~Case 28 は Case 1~Case 14 に加えて標準圧密試験を実施した場合である。推定範囲については, 狭い場合のみ検討した。パラメータの推定範囲は表 6 に示す。今回, 粘性土を想定しているため, 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。これは実質的に粒度を考慮したことになる。修正 Cam-clay model の検討と同様に各ケース 100 回計算を実施して, 妥当性を検討した。局所解に陥ったかどうか判定するパラメータは $\varepsilon = 10^{-3}$ とした。

図 13 に正解と推定値の差と $U(gbest^t)$ の関係を示す。図 13 は Case40 の 1 回目の検討の時であるが, 他の場合も同様の傾向となった。いずれのパラメータも $U(gbest^t)$ が小さいほど, 正解との差が小さくなる。図から, $U(gbest^t) < 10^{-6}$ であれば十分にパラメータの推定ができていると考えた。なお, 線が途切れているところがあるが, これは正解と推定値が完全に一致しているために, 対数軸では描画できない箇所となる。本検討では, 100 回中 $U(gbest^t) < 10^{-6}$ になった回数 N_s や, $U(gbest^t) < 10^{-6}$ になるまでの世代数の平均値 $Av.$ や世代数の標準偏差 $Std.$ を用いて各ケースの比較を行う。

表 5 の黄色でハッチしたケースが 100 回中 100 回推定できたケースである。CUB においては, 実験数が多いほど, 必ず推定できるようになってくる。ただし, 推定までにかかる平均回数 $Av.$ や標準偏差 $Std.$ に大きな差はない。一方, CD の方は, 実験の種類が多くしても, 必ず推定できるようにはならない。推定できていないケースを確認すると, b_r や m_b が推定できていないケースが多い。具体的には, m_b が小さく, b_r が大きめの値で停滞していた(程度はケースごとに違う)。なお, 1 回推定するまでにかかる速度は, 一般的なパソコンを用いて 60 分程度で完了するため, 粒子の数を増やすことで, 推定精度を上げることも可能である。

表 5 検討ケース (SYS Cam-clay model)

case	1	2	3	4
実施実験	CUB 100kPa	CD 100kPa	CUB 300kPa	CD 300kPa
N_s	88	12	99	100
$Av.$	-	-	-	1067
$Std.$	-	-	-	235
case	5	6	7	8
実施実験	CUB 500kPa	CD 500kPa	CUB 100,300kPa	CD 100,300kPa
N_s	100	96	100	100
$Av.$	769	-	771	552
$Std.$	139	-	124	106
case	9	10	11	12
実施実験	CUB 100,500kPa	CD 100,500kPa	CUB 300,500kPa	CD 300,500kPa
N_s	100	100	100	96
$Av.$	721	559	680	-
$Std.$	124	122	126	-
case	13	14	15	16
実施実験	CUB 100,300,500kPa	CD 100,300,500kPa	CUB 100kPa OED	CD 100kPa OED
N_s	100	84	99	100
$Av.$	668	-	-	605
$Std.$	112	-	-	106
case	17	18	19	20
実施実験	CUB 300kPa OED	CD 300kPa OED	CUB 500kPa OED	CD 500kPa OED
N_s	100	100	100	97
$Av.$	801	998	757	-
$Std.$	135	250	155	-
case	21	22	23	24
実施実験	CUB 100,300kPa OED	CD 100,300kPa OED	CUB 100,500kPa OED	CD 100,500kPa OED
N_s	100	100	100	100
$Av.$	823	568	674	576
$Std.$	117	136	129	156
case	25	26	27	28
実施実験	CUB 300,500kPa OED	CD 300,500kPa OED	CUB 100,300,500kPa OED	CD 100,300,500kPa OED
N_s	100	97	100	86
$Av.$	499	-	654	-
$Std.$	82	-	122	-

表 6 パラメータの推定範囲

m	a	c_s	b_r	m_b	R_0
1.0-30.0	0.01-1.0	0.1-0.9	0.01-1.0	0.01-1.0	0.013-0.05

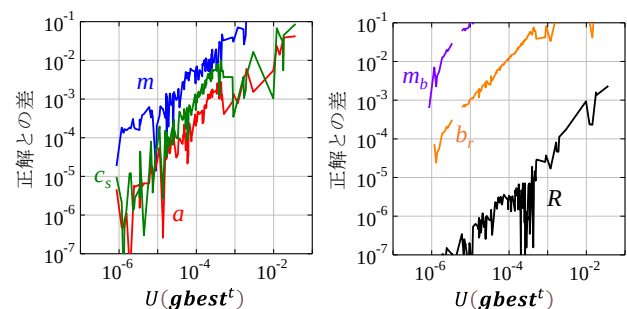


図 13 推定値と正解の差と $U(gbest^t)$ の関係

5. 実際の実験結果の再現

まず、図 7、図 8 に示す正規圧密土に対する実験結果を修正 Cam-clay model を用いて再現する。4 章の結果から粒子数を 800 個、パラメータ推定範囲は物性値から絞って再現を実施した。文献 16) から Joetsu clay の物性値である $w_L=72.5\%$ 、 $I_p=42.8$ や限界状態定数 $\tilde{M}=1.25$ からパラメータの推定範囲を決める。得られた推定範囲を表 7 に示す。なお、4 章と異なり、三軸圧縮試験(CUB)と標準圧密試験(OED)で比体積が異なるため、それぞれ推定する。

表 7 パラメータの推定範囲

$\tilde{\lambda}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{M}$	N	v (CUB)	v (OED)
0.127-0.283	0.020-0.060	1.20-1.30	0.01-0.49	1.977-2.027	2.091-2.141

表 8 にパラメータ推定結果、図 14、図 15 に再現結果を示す。表 8 に示す推定結果は、100 回の平均 Av. と標準偏差 Std. の 2 つを示す。表 8 より 100 回の検討で 100 回とも同じ結果が得られることがわかる。このことから修正 Cam-clay model のパラメータの推定方法として、提案手法は妥当であると言える。なお、この時、 $U(gbest^t) = 0.042$ であった。

表 8 100 回の推定結果のまとめ

		Av.	Std.
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.1838	0.0000
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.0471	0.0000
限界状態定数	$\tilde{M}$	1.2667	0.0000
NCL の切片 (98.1 kPa)	$\tilde{N}$	2.1778	0.0000
ポアソン比	ν	0.1462	0.0000
初期比体積(CUB)	v_0	1.9770	0.0000
初期比体積(OED)	v_0	2.0914	0.0000

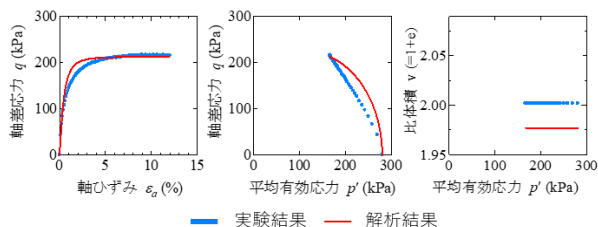


図 14 Joetsu clay の正規圧密土の三軸圧縮試験の再現結果

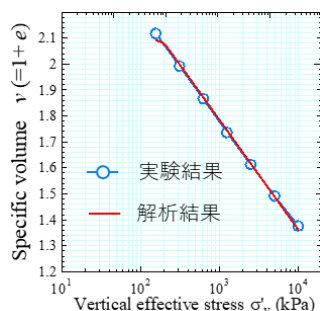


図 15 Joetsu clay の正規圧密土の標準圧密試験の再現結果

次に、図 9、図 10 に示す乱れの少ない Joetsu clay に対する実験結果を SYS Cam-clay model を用いて再現する。4 章と同様に粒子数を 800 個、パラメータ推定範囲は表 6 に示す値を用いて再現を実施した。弾塑性パラメータについては、表 8 で示したパラメータ、つまり繰返し正規圧密土の

再現から得られた結果を用いた。なお、三軸圧縮試験において等方圧密後の比体積のみ明らかになっているため、非排水せん断過程のみ計算を行った。また、4 章と異なり、実験ごとに初期状態が異なるため、それぞれ初期比体積と初期過圧密 R を推定する。

表 9 にパラメータ推定結果、図 16、図 17 に再現結果を示す。表 9 に示す推定結果は、100 回の平均 Av. と標準偏差 Std. の 2 つを示す。表 9 より 100 回の検討で 100 回ともほとんど同じ結果が得られることがわかる。このことから SYS Cam-clay model のパラメータの推定方法として、提案手法は妥当であると言える。なお、この時、 $U(gbest^t) = 0.085$ であった。

表 8 100 回の推定結果のまとめ

		Av.	Std.
正規圧密土化指数	m	5.7731	0.0055
構造劣化指数	a	0.4500	0.0023
$\ D_s^p\ $ と $-D_s^p$ の比	c_s	0.1000	0.0000
回転硬化指数	b_r	0.0163	0.0002
回転硬化限界定数	m_b	1.0000	0.0000
初期比体積(CUB 50kPa)	v_0	2.5310	0.0000
初期過圧密(CUB 50kPa)	R_0	0.2879	0.0001
初期比体積(CUB 200kPa)	v_0	2.3850	0.0000
初期過圧密(CUB 200kPa)	R_0	0.7393	0.0003
初期比体積(OED)	v_0	2.6523	0.0004
初期過圧密(OED)	R_0	0.1163	0.0025

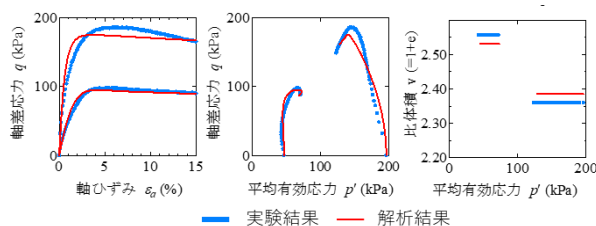


図 16 乱れの少ない Joetsu clay の三軸圧縮試験の再現結果

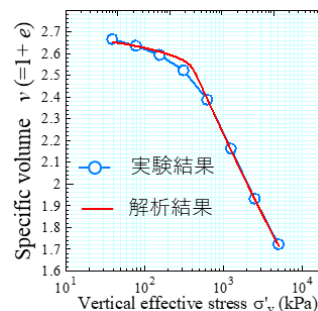


図 17 乱れの少ない Joetsu clay の標準圧密試験の再現結果

6. 結論

本研究では、粒子群最適化法を用い、自動的に実験結果を再現し構成則のパラメータを得る方法を提案した。提案手法を評価する方法として 1) 正解が分かっている問題から正解が確実に得られるかどうか 2) 実際の実験を再現する際に何回検討したとしても同じパラメータが得られるかどうかの方法で検討した。以下に結論を示す。

- 1) 修正 Cam-clay model の場合、実験が 1 つの場合、必ずしもパラメータの同定ができていたとは言えなかった。一方、実験が 2 個の場合は、パラメータの同定

が必ずできている。パラメータの推定の際は、実験を2種類実施した方が良いことを示唆している。なお、パラメータ推定範囲が狭い方が、速くかつ安定的に計算できることがわかる。

- 2) SYS Cam-clay model の場合についても、対象とする実験の数を増やすと、パラメータを必ず推定できるようになる傾向は得られた。ただし、排水せん断の方は、そうっていないケースがいくつか見られた。推定できていないケースを確認すると、 b_r や m_b が推定できていない場合が多く、この点は課題である。
- 3) 本手法を用いて実験の再現結果を実施したところ、100回検討で、実験結果を再現することができ、毎回ほとんど同じパラメータが得られた。
- 4) 以上のことから、練返し正規圧密粘土に対しては2つ実験(異なる拘束圧の圧密非排水 or 排水三軸圧縮試験2つか、圧密非排水 or 排水三軸圧縮試験と標準圧密試験)を実施し、乱れの少ない試料に対しては、3つ実験(異なる拘束圧の圧密非排水三軸圧縮試験を3つか、異なる拘束圧の圧密非排水三軸圧縮試験を2つと標準圧密試験)を実施すれば、本手法は実験結果を自動的に再現する手法として妥当であると言える。ただし、粒子数を増やすなどすることにより、少ない実験結果でも、適応できる可能性はある。

今回は粘土を対象としたが、粘土であっても練返し正規圧密土の実験結果がない場合もあり、砂の場合は、練返し正規圧密土が作製できない。このような、弾塑性パラメータも分からない場合についても検討を進めたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、株式会社奥村組から助成を受けた。また、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。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Levasseur, S., Malecot, Y., Boulon, M. and Flavigny, E.: Soil parameter identification using a genetic algorithm, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol.32, pp.189-213, 2008.
- 2) Jin, Y., Wu, Z., Yin, Z. and Shen, J.: Estimation of critical state-related formula in advanced constitutive modeling of granular material, *Acta Geotechnica*, vol. 12, pp.1329-1351, 2017.
- 3) Samarajiva, P., Macari, J. E.; and Wathugala, W.: Genetic Algorithms for the Calibration of Constitutive Models for Soils, *International Journal of Geomechanics*, Vol.5, Issue 3, pp.206-217, 2005.
- 4) Rokonuzzaman, Md. and Sakai, T.: Calibration of the parameters for a hardening softening constitutive model using genetic algorithms, *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, Issue 4. pp. 573-579, 2010.
- 5) Kennedy, J. and Eberhart, R. C.: Particle swarm optimization, *Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp.1942-1948, 1995.
- 6) Zhu, B. and Chen, Z.: Calibrating and validating a soil constitutive model through conventional triaxial tests: an in-depth study on CSUH model, *Acta Geotechnica*, vol. 17, pp.3407-3420, 2022.
- 7) Zhang, Y., Gallipoli, D. and Augarde, C.: Parameter identification for elasto-plastic modelling of unsaturated soils from pressuremeter tests by parallel modified particle swarm optimization, *Computers and Geotechnics*, Vol. 48, pp. 293-303, 2013.
- 8) Knabe, T., Datcheva, M., Lahmer, T., Cotecchia, F. and Schanz, T.: Identification of constitutive parameters of soil using an optimization strategy and statistical analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol. 49, pp. 143-157, 2013.
- 9) Yazdi, S. J., Kalantary, F. and Yazdi, S. H.: Calibration of Soil Model Parameters Using Particle Swarm Optimization, *International Journal of Geomechanics*, Vol.12, Issue 3, pp.229-238, 2012.
- 10) Song, Z., Liu, S., Jiang, M. and Yao, S.: Parameter Determination Method of Soil Constitutive Model Based on Machine Learning, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2022, ID. 3765169.
- 11) Zhang, P., Yin, Z. Y., Jin, Y. F. and Liu X. F.: Modelling the mechanical behaviour of soils using machine learning algorithms with explicit formulations, *Acta Geotechnica*, vol. 17, pp.1403-1422, 2022.
- 12) Zhang, P., Yin, Z. Y. and Jin, Y. F.: State-of-the-Art Review of Machine Learning Applications in Constitutive Modeling of Soils, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 3661-3686, 2021.
- 13) Kadlíček, T., Janda, T., Šejnoha, M., Mašín, D., Najser, J. and Beneš, Š.: Automated calibration of advanced soil constitutive models. Part II: hypoplastic clay and modified Cam-Clay, *Acta Geotechnica*, vol. 17, pp.3439-3462, 2022.
- 14) Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the generalized stress-strain behavior of wet clay. In: *Engineering Plasticity*. Cambridge University Press, pp. 535-609, 1968.
- 15) 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.
- 16) Liang, J.J. and Suganthan, P.N: Dynamical multiswarm particle swarm optimizer, *Proc. of the IEEE swarm intelligence symposium*, pp.124-129, 2005.
- 17) Nakai, K., Noda, T. and Kato, K.: Seismic assessment of sheet pile reinforcement effect on river embankments constructed on a soft foundation ground including soft estuarine clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.54, Issue 10, pp. 1375-1396.
- 18) Nakano, M., Nakai, K. Noda, T. and Asaoka, A.: Simulation of shear and one-dimensional compression behavior of naturally deposited clays by Super/subloading Yield Surface Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp. 141-151, 2005.
- 19) 古川正志, 川上敬, 渡辺美智子, 木下正博, 山本雅人, 鈴木育男: メタヒューリスティックとナチュラルコンピューティング, コロナ社, 2012.
- 20) Giasi, C.I., Cherubini, C. and Paccapelo, F.: Evaluation of compression index of remoulded clays by means of Atterberg limits, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 62, pp.333-340, 2003.
- 21) Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O.: Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, Issue 7, pp.844-858, 1988.
- 22) Tiwari, B. and Ajmera, B.: Consolidation and swelling behavior of major clay minerals and their mixtures, *Applied Clay Science*, Vol.54, pp. 264-273, 2011.