

逆解析による長期圧密沈下予測法の検討

岡山大学大学院環境生命科学研究科 正会員 ○西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行

1. はじめに

本研究は、実測値から圧密に関するパラメータを同定し、将来の沈下予測を行うものである。ここでは、二次圧密を含めた粘性土のひずみ速度依存性挙動を考慮したパラメータ同定法の開発を目指している。粘性土のひずみ速度依存性を明らかにするために分割型圧密試験¹⁾を実施しており、4連の圧密容器を用いて4層の粘土の挙動を計測している。一次圧密の予測にはパラメータの非線形性と不均質性を同時に考慮する「統計的非線形モデル」²⁾を用いている。本研究では、このモデルの圧密挙動への適用性と沈下予測性能を考察している。

2. 実験材料および実験方法

実験材料としては、笠岡海成粘土を用いている。材料の物理特性は Table 1 に与えるとおりであり、実験には、本試料を大型圧密容器内で 40kPa で予備圧密したものを切り出して用いている。試験に用いた試料の初期含水比は 86.5% である。実験方法としては、4 連結の分割型試験機を使用しており、試験機の概要は Fig.1 に示すとおりである。試料厚さは 2 cm, 試料直径は 6 cm で、上部の試料から No.1, No.2, No.3, および No.4 とする。それぞれの試料の上面で変位を、下面で間隙水圧を計測している。载荷は段階载荷によって行われ、40→320 kPa まで荷重増分比 1:1 で载荷する。载荷時間は、間隙水圧の消散速度を考慮して、一段階当たり 7d としている。

3. 圧密挙動のモデル化

時間 t における一次圧密沈下量と二次圧密沈下量をそれぞれ $S_1(t)$, $S_2(t)$ とすると、沈下量 $S(t)$ は式 (1) で与えられる。ここでは、二次圧密は、間隙比の減少速度 $-\dot{e}$ が限界値 $-\dot{e}_0$ を下回ったときに生じるものと仮定している。

$$S(t) = S_1(t) \quad (-\dot{e}_0 < \dot{e}) \quad S(t) = S_1(t) + S_2(t) \quad (-\dot{e}_0 \geq -\dot{e}) \quad (1)$$

本研究では、载荷条件や、境界条件が複雑な場合も対応できることを考慮して、一次圧密量を求めるために有限要素法を用いている。一次圧密を支配するパラメータは、体積圧縮係数 m_v および透水係数 k である。二次圧密部分の沈下解析には二次圧密開始時間 ($\log t$ 法結合時間) を t_a として次式から決定する。

$$S_2(t) = r_a m_v H \cdot \ln\left(\frac{t}{t_a}\right) \quad t_a = t \Big|_{\dot{e} = -\dot{e}_0} \quad (2) \quad r_a: \text{二次圧密係数比}$$

4. 統計的非線形モデルおよびパラメータ同定法

体積圧縮係数は、最大有効応力の関数として式 (3), (4) のように定義する。ここで、 m_v の非線形性を表現するのに、補正係数 $C_{m_v}(\sigma_1')$ を導入する。また、浸透に対しても、透水係数 k の圧密の進行に伴う変化を考慮するために、初期透水係数 k_i に $C_k(e)$ (式 (6)) を乗じるという方法を用いる。

$$m_v = C_{m_v}(\sigma_1') m_{v,i} \quad (3) \quad C_{m_v}(\sigma_1') = m_{v,p}(\sigma_1') / m_{v,p}(\sigma_{1,0}') \quad (4) \quad \sigma_1': \text{有効最大主応力} \quad m_{v,i}: \text{初期体積圧縮係数}$$

$\sigma_{1,0}':$ 初期有効最大主応力 $m_{v,p}$: サンプリングによる試験等の事前情報から決定される体積圧縮係数

$$k = C_k(e) k_i \quad (5) \quad C_k(e) = k_p(e) / k_p(e_0) \quad (6)$$

e : 間隙比 k_i : 初期透水係数 e_0 : 初期間隙比 k_p : 試料の土質試験等の事前情報から決定される透水係数

(4), (6) 式の $m_{v,p}$ と k_p の統計的非線形モデルに対してモンテカルロ法を適用し、最適な C_{m_v} および C_k が決定される。具体的

Table 1 実験材料の物理特性

Density of soil particle ρ_s (g/cm ³)	Liquid limit w_L (%)	Plastic limit w_P (%)	Plasticity index I_p	Clay fraction (%)	Silt fraction (%)
2.694	102	30.6	71.4	55	45

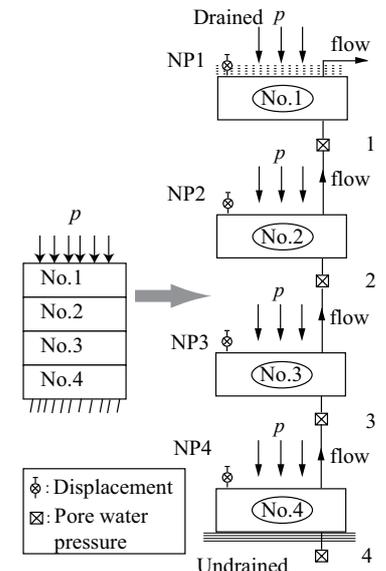


Fig.1 分割型圧密試験の概要

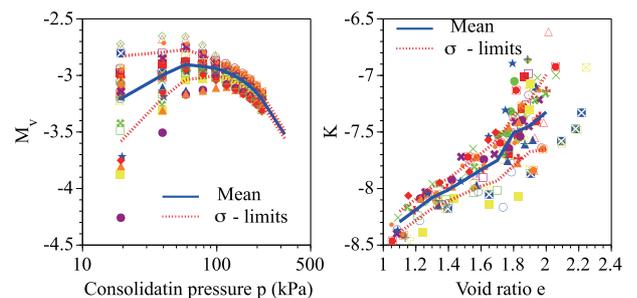


Fig.2 パラメータの非線形性と変動性 (実験では $p = \sigma_1'$)

には、室内圧密試験結果から決定された $M_v = \log m_{vp}$, $K = \log k_p$ の統計モデルに対して乱数を適用し、複数の補正係数から最適なものを選択する。統計モデルは、次式で与えるものとする。

$$M_v(\sigma_1) = \mu_{M_v}(\sigma_1) + \sigma_{M_v}(\sigma_1)\xi_{M_v}(\sigma_1) \quad (7)$$

$$K(e) = \mu_K(e) + \sigma_K(e)\xi_K(e) \quad (8)$$

μ_{M_v} , μ_K は平均値関数, σ_{M_v} , σ_K は標準偏差関数, ξ_{M_v} , ξ_K は $N(0,1)$ の正規確率変数で、自己相関関数³⁾に従い、乱数で与えられる。この自己相関関数は、2点 (i, j) 間の体積圧縮係数と透水係数の最大主応力軸方向、間隙比方向、水平、鉛直方向におけるパラメータの相関性を表すものである。Fig.2には、対象試料の標準圧密試験結果から、 $M_v = \log m_{vp} - \sigma_1$ および $K = \log k - e$ 関係を整理し、 M_v と K の平均値関数と標準偏差を決定した結果を示している。全体のパラメータ同定アルゴリズムを Fig.3 に示す。ここでは、非線形最適化法とモンテカルロ法を組み合わせた方法を用いている。パラメータ同定では、パラメータの空間的な相関性も、相関距離を導入して考慮している。

5. 解析結果

Fig.1の分割型圧密試験を有限要素モデル化し、解析を行った。図中の EL1, EL2, EL3, EL4 で間隙水圧が、節点 NP1, NP2, NP3, NP4 で変位が計測されるとしている。载荷段階 80 kPa → 160 kPa および 160 kPa → 320 kPa を解析の対象とし、時間 - 沈下曲線および時間 - 間隙水圧曲線を実験値とともに Fig.4(a) および (b) に与えている。図によると、同定されたパラメータを用いた解析によって、将来沈下量が比較的精度良く予測されているのが分かる。ただし、载荷段階 160 kPa → 320 kPa の結果については、二次圧密を若干過小評価する結果となった。間隙水圧に関しては、圧密初期に、排水面に近い部分で若干適合度が悪いが、全体的に良く解析が実測値を模擬している。

6. まとめ

分割型圧密試験結果に対して逆解析を実施した。予測沈下量は実測値に良く適合し、本研究で用いたモデル化とパラメータ同定法が良く機能することが実証できた。

引用文献 1) Imai, G.: Compression and consolidation of clayey soils, Vol.2, pp.891-935 (1995) 2) 西村ら：計算工学論文集, Vol.15, No.1, pp.949-952 (2010) 3) 西村ら：第17回応用力学シンポジウム概要集 (2014)

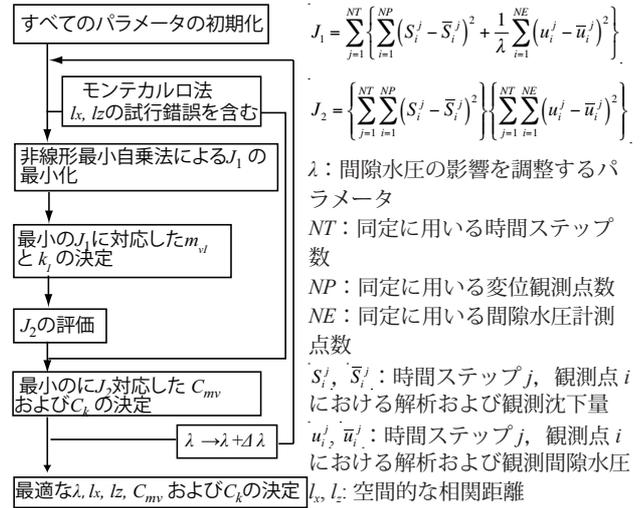


Fig.3 パラメータの同定アルゴリズム

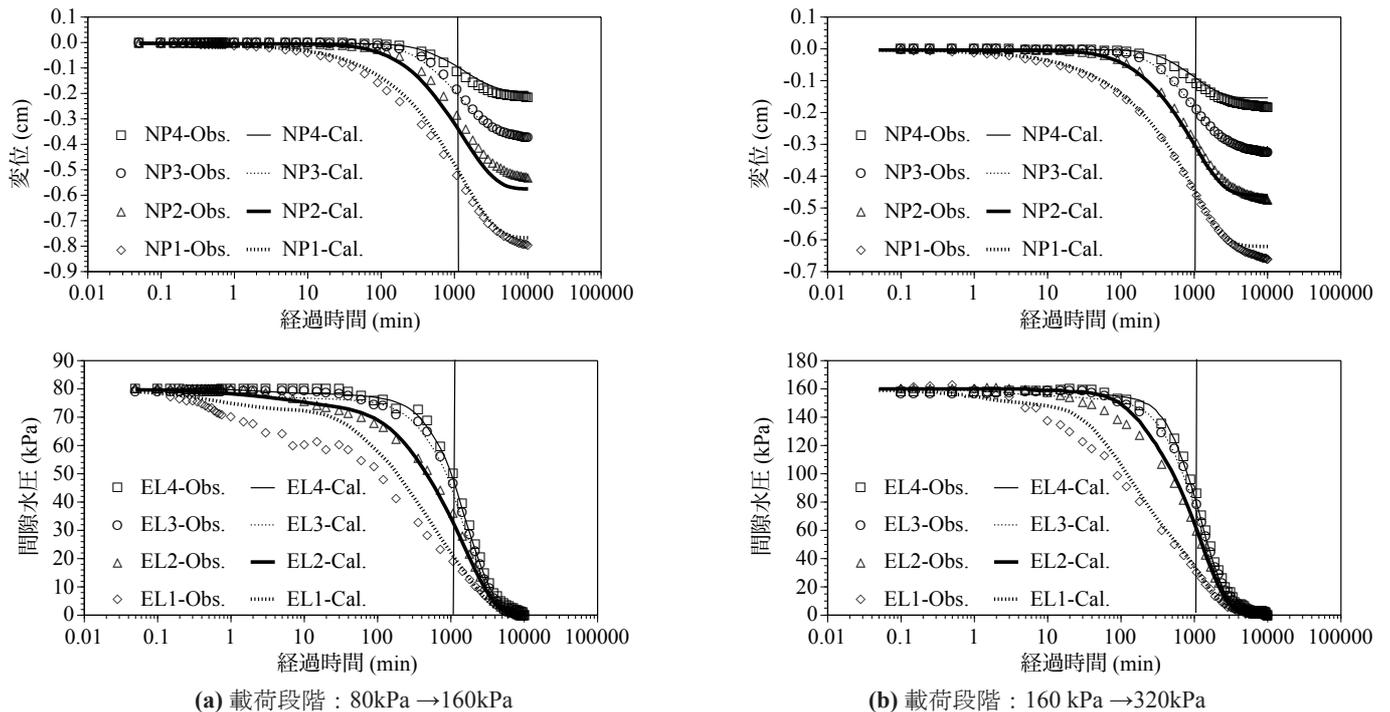


Fig.4 同定結果に基づく計算値と実測値 (同定期間 1080 min Obs.: 実験値 Cal.: 解析値)