

一次元圧縮粘土の有効応力経路

東海大学大学院 学生会員 ○池谷 真希
 新日本開発工業 正会員 赤石 勝
 金沢工業大学 正会員 外崎 明
 東海大学 正会員 杉山 太宏

1. 緒言

過圧密粘土の応力ひずみ関係は、有限要素解析で等方弾性体と仮定される場合が多く、正規圧密粘土に比べその変形量は小さい。しかし、過圧密から正規圧密領域に跨る地盤内応力変化による一次元圧縮変形を考える場合、等方弾性体の仮定では過圧密粘土の静止土圧の再現が難しい。過圧密粘土の静止土圧係数 K_0 値は、正規圧密粘性土より大きく、過圧密比とともに変化することが知られている¹⁾。また、正規圧密粘土のポアソン比 ν は、 K_0 値を用いて $\nu = K_0 / (1 + K_0)$ として推定するのが一般的である。二次圧密とともに K_0 値が増加する場合²⁾の弾塑性有限要素解析では、塑性ポテンシャル Q の変化でこれに対応することを著者らは提案しているが、過圧密粘土の場合、 ν と K_0 値との関係をどうすべきか明らかでない³⁾。また、過圧密粘土の降伏面内で発生する塑性ひずみを考慮する特殊な場合、一次元圧縮の有効応力を実測値に対応させる ν と Q の仮定はさらに難しい。過圧密粘土に塑性ひずみを考慮する場合は、 Q に関する仮定が一次元圧縮時の有効応力に及ぼす影響も無視できない。

この報告は、室内試験と FE 解析によって 1) 正規圧密ならびに過圧密粘土の一次元圧縮時 (K_0C) の水平方向有効応力 σ_H 、2) 過圧密粘土を弾性体とした場合の ν の仮定と K_0C の σ_H 、3) 過圧密粘土の降伏面内で発生する塑性ひずみを考慮する場合の K_0C の σ_H 、すなわち有効応力経路について検討した。

2. 試料および実験方法

試料は、再構成した 3 種類の粘性土で、物理的特性を表-1 に示した。三軸 K_0 圧密試験で載荷・除荷・再載荷過程の有効応力経路を調べた。 K_0 圧密試験は、鉛直圧密応力増分を一定に保ち、軸ひずみと体積ひずみが等しくなるよう水平応力増分を制御する方法を採用した。

表-1 試料の物理的特性

試料	G_s	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	粘土(%)	シルト(%)	砂分(%)
K	2.64	112	50.5	47	38.4	14.6
S	2.67	82.6	20.8	54	41	5
M	2.64	67.4	36.3	34	55.3	10.7

3. 実験結果と考察

図-1 は正規圧密試料 K の K_0 圧密試験の圧密量時間関係である。圧密期間を長くし、二次圧密を観測しているが、その間の正規圧密過程で σ_H はほぼ一定値を示しており、 K_0 値は 0.4 である。

図-2 は、試料 M の K_0 圧密・除荷・再載荷試験における有効応力経路を示している。図中○印で示した試料の正規圧密における有効応力経路は、原点を通る直線で近似でき、 K_0 値は一定である。●印で示した除荷過程の有効応力経路も等方応力状態となる過圧密比 $OCR=3$ 付近まで、ほぼ直線で近似可能である。また、×印で示した再載荷過程の有効応力経路は、除荷過程の直線とほぼ一致している。

過圧密粘性土の静止土圧係数を除荷・再載荷過程で区別せず K_{0OC} とし、正規圧密における K_{0NC} 値との比をとり、 OCR との関係を示したのが図-3 である。 K_{0OC} / K_{0NC} と OCR の関係は、両対数紙上でほぼ直線関係が存在する¹⁾。 K_{0NC} 値と OCR の 1/2 乗の積が K_{0OC} 値に近い値であることを確認しうる。

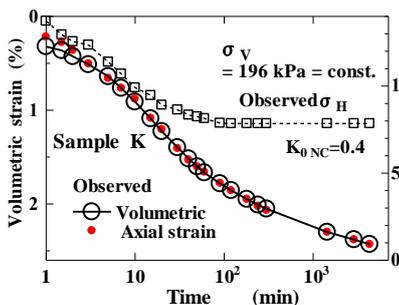


図-1 K_0 圧密試験 (試料 K)

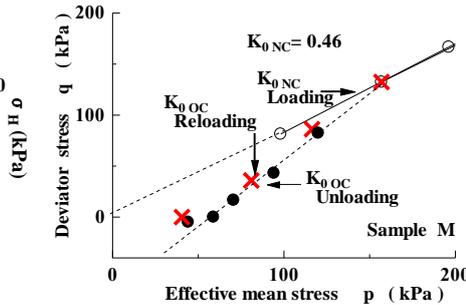


図-2 K_0 圧密試験の有効応力経路 (試料 M)

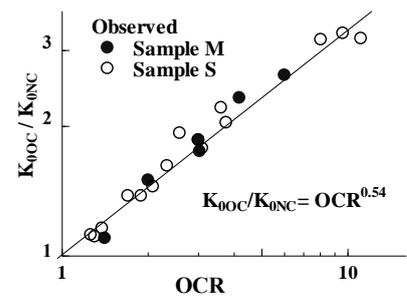


図-3 K_{0OC} / K_{0NC} と OCR の関係

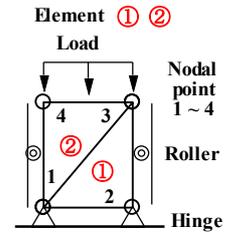
キーワード：有効応力経路，ポアソン比，過圧密，FE 解析

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 TEL 0463-58-1211 E-mail: sugi@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

4. 計算結果と考察

4.1 弾塑性 FE 解析プログラムと土質定数

試料 M の有効応力経路に対して弾塑性 FE 圧密解析プログラム CRISP⁴⁾でカムクレイを用いた計算を行った。必要な定数は試験結果から、 $\lambda(=0.095)$, $\kappa(=0.015)$, 限界状態線 CSL の勾配 $M=1.6$, 平均有効応力 1kPa における間隙比($=\Gamma-1=1.750$), $K_0=0.46$ から $\nu=K_0/(1+K_0)=0.315$ とした。検討に用いた一次元排水圧縮の要素図を図-4 に示した。



CD K_0 compression
図-4 要素図

4.2 正規圧密土の K_0 圧縮有効応力経路

正規圧密粘土の荷重前初期鉛直有効応力 $\sigma_{y0}=100$ kPa, 静止土圧係数 K_0 値=0.46, 荷重増分 $d\sigma_y=100$ kPa である。弾性と弾塑性モデル(オリジナルと修正カムクレイ)の一次元排水圧縮の有効応力経路の計算結果を図-5 に示した。弾性モデルの場合, 荷重前後の K_0 値は一定で, 有効応力経路は K_0 線上にある。弾塑性モデルの場合には, 荷重後の K_0 値が増加する。正確に計算されたのは弾性モデルのみで, カムクレイモデルで仮定する塑性ポテンシャル Q の不具合によるものと考えられる。

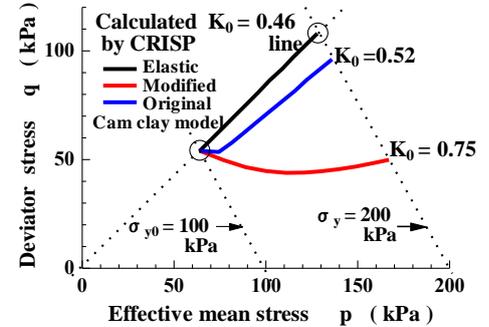


図-5 有効応力経路

4.3 過圧密土の K_0 圧縮有効応力経路

過圧密土は, $\sigma_y=200$ kPa で K_0 正規圧密後 $\sigma_{y0}=\sigma_{x0}=70$ kPa の等方応力状態まで除荷・吸水膨張させた OCR 約 2.9 を初期状態とした。等方弾性体と仮定してポアソン比のみを変化させた有効応力経路は, 図-6 に示すようにいずれも直線である。正規圧密時の K_0 値($=0.46$)から求めた $\nu=0.315$ の計算では, 正規圧密時の K_0 線と平行である。 $K_{0OC} \approx 0.82$, $\nu=0.45$ とした場合には等方圧縮に近くなり, 実測値のように K_0 線に戻すには $\nu=0.15$ にする必要がある。

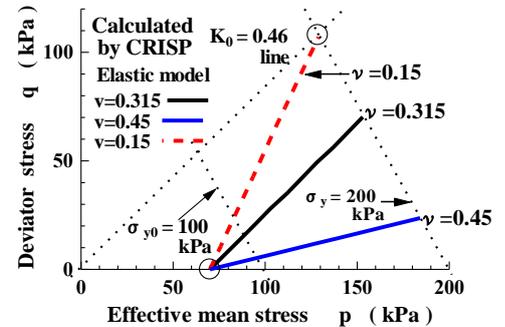


図-6 過圧密粘土の有効応力経路
(弾性体)

4.4 過圧密土に塑性ひずみが含まれると仮定した K_0 圧縮有効応力経路

正規圧密 M 粘土の K_0 値=0.46 を用い, 等方過圧密の 70kPa の初期応力から K_0 圧縮した場合の有効応力経路の計算結果を図-7 に示した。過圧密土にも塑性ひずみが含まれると仮定して, 図-6 の結果から $\nu=0.15$ とし, λ を変化させた。しかし, 図-7 の計算結果は実測値と一致しない。過圧密土に発生する塑性ひずみを考慮する場合, ν と Q を適切に選択しないと計算されたひずみが実測値に近くても作用応力が実際と異なることになる。

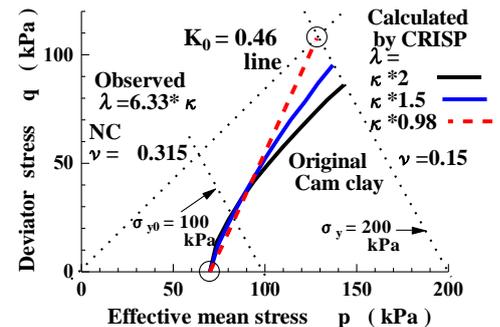


図-7 過圧密粘土の有効応力経路
(弾塑性体)

5. おわりに

弾塑性 FE 解析に利用するひずみと応力の関係を K_0 圧縮時の有効応力経路から検討した。得られた結果は次のようである。1) 正規圧密土の弾性ひずみは, K_0 値から ν を決定すれば K_0 条件を満足する。2) 塑性ひずみの K_0 条件は仮定する Q 次第である。3) 過圧密土は K_0 値に対応した ν の値を選択することで一次元圧縮の実測有効応力経路に近い計算結果を得ることができる。4) 過圧密土に塑性ひずみを考慮すると仮定する Q が K_0 応力条件を満足することは難しい。

弾性・塑性両ひずみ成分がそれぞれ K_0 条件を満足するのが実務的には便利である。過圧密土に塑性ひずみを考慮するには, 採用する Q の妥当性と過圧密比に対応した ν の選択に注意する必要がある。

参考文献

- 1) 山内豊聡, 安原一哉: 粘性土の静止土圧係数に関する一考察, 土質工学会論文集, Vol.14, No.2, pp.113-118, 1974.
- 2) 赤井浩一, 佐野郁雄: 二次圧密における粘性土の状態変化, 土木学会論文集, No.364, pp.123-131, 1985.
- 3) 飯沼孝一, 今井誉人, 赤石勝, 杉山太宏: 一次元圧密における有効応力経路と塑性ポテンシャル, 土木学会論文集, vol.71, No.2, 119-124, 2015
- 4) Britto, A. M. and Gunn, M. J.: Critical state soil Mechanics via Finite Elements, Ellis Horwood, 1987.