

弾粘塑性有限要素一次元圧密解析における一次圧密量

東海大学 正会員 ○杉山 太宏
 東海大学大学院 学生会員 吉富 隆弘
 (株)オオバ 正会員 飯沼 孝一
 新日本開発工業(株) 正会員 赤石 勝

1. まえがき

標準圧密試験の荷重圧密期間は1日であるが、ほとんどの粘土の一次圧密は1時間以内に終了する。したがって、1日後の圧密沈下量から求める圧縮指数 λ や体積圧縮係数 m_v には、かなりの二次圧密量が含まれていると考えられる。二次圧密を考慮した一次元圧密解析で、慣用的な圧縮指数 λ により一次圧密量を求める場合、二次圧密量の二重評価で過大な圧密沈下量を予測する可能性がある。この報告は、弾粘塑性有限要素圧密解析において、慣用的な圧縮指数を利用した場合の二次圧密量の二重評価について検討している。

2. FE 解析の圧縮指数と塑性ポテンシャル

圧密試験から得られる一般的な圧縮指数 λ が弾粘塑性 FE 解析に利用されているが、この報告では一次圧密比 λ^*/λ を仮定し、 λ^* を一次圧密量で定義される圧縮指数とした¹⁾。また、一次元圧密における二次圧密の既往の研究成果²⁾を多次元 FE 圧密解析に利用するため、式(1)の塑性ポテンシャル Q を採用する³⁾。

$$Q(=F) = 3\bar{\sigma}^2 + M^2 \cdot \sigma_m (\sigma_m + p_0) + \gamma \cdot \sigma_m (2\sqrt{3}\bar{\sigma} + \gamma \cdot p_0) \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\sigma}^2$ は偏差応力の第二不変量、 M は CSL の勾配、 σ_m は平均有効応力、 p_0 は $\bar{\sigma}^2=0$ の平均有効応力、 γ は一次元圧密時の有効応力状態と静止土圧を対応させるための定数で、 $\gamma=0$ とした Q は修正 Cam Clay モデルと一致する。なお、 F は降伏関数であり関連流動則を採用した。

塑性ひずみ成分と二次圧密によるひずみ速度成分に式(2)、(3)の粘塑性流動則を用いた³⁾。

$$\dot{\epsilon}_p = \langle F \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (2), \quad \dot{\epsilon}_s = \langle \dot{v}_s \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (3)$$

ここに、アンダーラインは行列を意味し、 $\langle \rangle$ 内の値は負の場合ゼロとする。

3. 有限要素一次元圧密 FE 解析に関する既往の研究

FEM 適用に関する研究委員会（以後 FEM 委員会）²⁾の一次元圧密 FE 解析で採用された土質定数と計算条件を表-1に示した。ポアソン比 $\nu=0.3$ では、弾性ひずみ成分が K_0 応力状態を再現しないため、静止土圧係数 $K_0=0.489$ から決定したポアソン比 $\nu(=K_0/(1+K_0)) \approx 0.328$ を採用した。また、一次元圧密連成 FE 解析には、四角形アイソパラメトリック要素（変位 8 節点&水圧 4 節点）を用い、要素数は 10 行 1 列とした。

FEM 委員会では、複数の研究者がそれぞれのプログラムで連成弾塑性ならびに連成弾粘塑性解析を実施し、手計算で得られる一次元圧密沈下量ならびにその経時変化を比較・検討している。図-1に×印で示した弾塑性モデルによる計算結果は、圧縮指数を利用した簡便法による手計算の結果（赤破線）よりも小さいが、各研究者の計算結果にはほとんど差がない。これに対し、弾粘塑性モデル（○、●）では、 10^3 日で最大約 30cm の差があり、手計算よりも大きく計算されることが注目される。

表-1 土質調査と室内試験の結果

| 圧縮指数 λ | 膨潤指数 κ | 内部摩擦角 ϕ (°) | ポアソン比 ν | 透水係数 k (m/day) | 二次圧密係数 α |
|----------------------|---|------------------|-------------|--------------------------------------|-----------------|
| 0.1 | 0.01 | 40 | 0.3 | 0.002 | 0.004 |
| 二次圧密の初期速度 dv_0/dt | 初期鉛直有効応力 σ_{vi} (kN/m ²) | 静止土圧係数 K_0 | 初期間隙比 e_0 | 荷増分 $d\sigma_v$ (kN/m ²) | |
| 3.0×10^{-4} | 12 | 0.489 | 0.5 | 100 | |

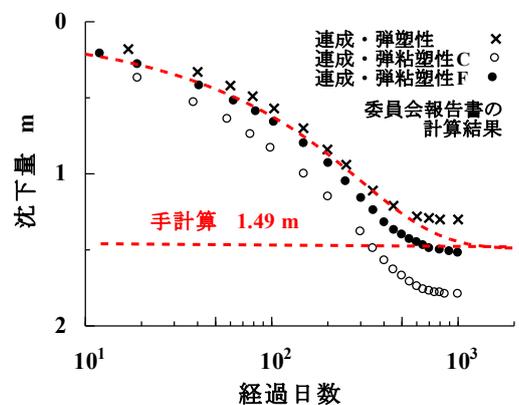


図-1 FEM 委員会による計算結果の比較

キーワード：FE 解析，一次元圧密，弾粘塑性モデル，一次圧密比

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. 実験・計算結果と考察

4.1 FEM 委員会計算結果の検証

図-2の黒実線は、式(1)の定数 $\gamma=0.5$ で圧縮指数 $\lambda^*=\lambda$ 、二次圧密係数 $\alpha=0$ とした弾塑性一次元圧密 FE 解析結果である。図中の CRISP はケンブリッジ大学の Britto ら、ODC は著者らの作成した有限要素法プログラムであり、ODC による沈下量は経過日数 10^3 日で手計算の圧密沈下量 1.49m と一致する。

CRISP では、弾性体（赤破線）、オリジナルカムクレイ（青破線）、修正カムクレイ（赤実線）の3条件で計算した。弾性体モデルの圧密沈下量は手計算と一致するが、修正カムクレイのそれは少し大き目となる。

一次圧密比 $\lambda^*/\lambda=1, 0.8$ あるいは 0.6 と変化させたプログラム ODC による弾粘塑性解析の結果が図-3 である。 λ^*/λ の減少とともに圧密沈下量は減少するのは当然の計算結果であるが、計算された二次圧密係数は設定したそれに等しく、圧密沈下量時間曲線は互いに平行である。弾粘塑性解析では、仮定する二次圧密の初期速度 v_0 が予測精度に大きく影響することは知られているが、図-1 に示した弾粘塑性モデルによる計算沈下量の違いは、一次圧密量を予測する評価方法によるところが大きいことを図-3 は示している。

4.2 実験結果と計算結果の比較

FEM 委員会の検討では、竜田らの実施した日立粘土の試験結果を利用している。著者らも現場近隣から採取した図-4 に記号で示す最大排水距離 $H \approx 1$ cm の圧密量時間曲線を利用し、計算に利用した圧縮指数と計算される結果を比較した。

計算に用いる土質定数は次のように決定した。1 日後の全圧密量 $\Delta v_f (=0.0953)$ から慣用的圧縮指数 λ を求める。ただし、載荷前の鉛直応力と初期間隙比は異なる。二次圧密係数 α は、120 分以降の圧密量時間曲線の勾配から決定する。全圧密量時間曲線に \sqrt{t} 法を適用して圧密係数を求め、透水係数 k と水の単位体積重量 γ_w の比を $k/\gamma_w = m_v \cdot c_v$ から決定する。静止土圧係数 K_0 、膨張指数 κ および限界状態線の勾配 M は、別途実施する試験から求める。式(1)の Q の定数 γ は、実測静止土圧係数 K_0 値を再現するように試行計算から決定する。

これらの値を利用した計算結果が図-4 の実線と破線で、実測値に近くなるように一次圧密比を設定した。実線で示した $\lambda^*/\lambda=0.5$ と 0.7 において実測値に極めて近い結果が得られた。 $\lambda^*=\lambda$ ($\lambda^*/\lambda=1$) として、慣用的圧縮指数を用いた破線の結果は、当然ながら実測値よりもかなり大きく計算される。一次圧密量に慣用的圧縮指数 λ を使用することで、二次圧密を二重評価してしまうことを示す結果である。

5. おわりに

FE 委員会の計算結果において、粘性を考慮しない弾塑性解析の結果は慣用法による沈下量(手計算 1.49m)よりも 1 割強小さく計算され、CRISP の修正カムクレイモデルではやや大きく計算された。弾粘塑性一次元圧密 FE 解析では、慣用的圧縮指数 λ を使用すると二次圧密量を二重に評価してしまう可能性を指摘した。

参考文献

- 1) 白子,杉山,外崎, 赤石：一次圧密中に発生する二次圧密の推定, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.565-570, 2008.
- 2) 地盤工学会：地盤工学における FEM の設計への適用に関する研究委員会活動報告書, pp.72-74, 平成 17 年 3 月
- 3) 飯沼,今井,赤石,杉山：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 C(地圏工学), Vol.71, No.2, pp.119-124, 2015.

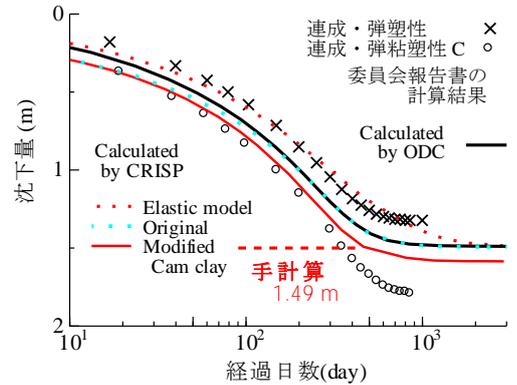


図-2 FE 解析の結果（弾塑性解析）

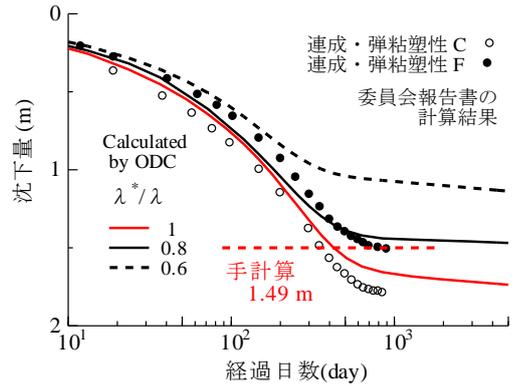


図-3 FE 解析の結果（弾粘塑性解析）

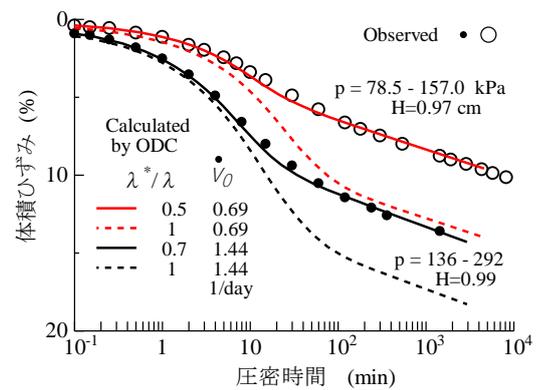


図-4 室内試験結果の再現計算と一次圧密比