

弾塑性理論にもとづく逆解析モデルの弾・粘塑性挙動予測の有効性

鹿児島大学工学部 学○後藤国彦 正 三隅浩二
同 上 学 佐藤 清 学 原 康介

1. はじめに 平均主応力一定排水せん断試験の体積ひずみのデータから簡単に正規圧密粘土の降伏曲線を決定する手法¹⁾をすでに提案しているが、この降伏曲線を使った弾塑性解析が果してどれほど有効であるのかは、平均主応力一定条件以外の試験経路で得られる応力ひずみ曲線を予測することで確かめることができる。

ところで、粘土の挙動は大なり小なり載荷速度効果やクリープ変形などの時間依存性を呈する。近年、そのような複雑な粘土の時間依存性挙動をうまく説明できるモデルとして弾・粘塑性構成式が提案されてきている。そこで本報告では、関口、太田による弾・粘塑性構成式²⁾から計算される応力ひずみ曲線を実際の三軸試験の挙動と見なして、上記、弾塑性理論にもとづく逆解析モデルの適用を試み、その有効性を調べている。

2. 塑性指数により決められた弾・粘塑性挙動の予測 図1、図2のプロットは関口・太田モデル(式(1))によって計算された平均主応力一定排水せん断試験($p' = 2 \text{ kgf/cm}^2$)の体積ひずみ v およびせん断ひずみ ε のデータである。弾・粘塑性パラメータは $I_p = 15\%$ の粘土のせん断挙動をうまく説明することができる。 $M = 1.3041$, $D = 0.0426$, $\Lambda = 0.7452$, $N' = 0.6964$, $\alpha = 0.0044$, $v = 0.000213 (1/\text{day})$ を採用した³⁾。また、平均主応力一定条件では、 $\dot{q} = \text{const.}$ とすれば、 $\dot{\eta}' = \text{const.}$, $\dot{\sigma}_s = \text{const.}$ であり、考えられるすべてのせん断速度が一定となる。

図1の実線は、関口・太田モデルの体積ひずみ v のデータにあてはめた実験公式のラインであり、これより降伏曲線を決定するために必要なパラメータ a , b , c および土質パラメータ M , D を決めている。ここで、弾塑性モデルより得られる体積ひずみをあえて ε_v で表す。これらより塑性ひずみ増分比 ϕ が式(5)により計算できる。 ϕ は応力経路に関わらない値であり、降伏曲線の形を決定する。

図2の2つの実線は、関口・太田モデルのせん断ひずみ ε のデータにできるだけフィットするように引いたラインであり、これより弾塑性モデルのパラメータ Λ , N' を決定している。ここで、弾塑性モデルより得られるせん断ひずみ(式(3))をあえて ε_s で表している。図2よりわかるように、体積ひずみ v のデータを最優先して降伏曲線(すなわち塑性挙動のメカニズム)を決定したために、残りの弾性挙動を決めるパラメータ Λ , N' の組合せを常識的にとりうる範囲でいくら変化させても弾・粘塑性挙動 ε の特にせん断後期の挙動をうまく説明することができないことがわかる。

さて、図3、図4のプロットは関口・太田モデル(式(2))によって計算された拘束圧一定排水せん断試験の体積ひずみ v およびせん断ひずみ ε のデータである。黒丸のプロットは平均主応力一定試験における応力比速度($\dot{\eta}' = 0.1/\text{day}$)を一定にしてせん断し、白丸のプロットは平均主応力一定試験における軸差応力速度($\dot{q} = \text{kgf/cm}^2/\text{day}$)を一定にしてせん断している。ここで、図4、図5の弾・粘塑性挙動で、 $\dot{q} = \text{const.}$ のプロットと $\dot{\eta}' = \text{const.}$ のプロットに大きな差がないことは興味深い。

図3では、図1、図2で得られた弾塑性モデルによる逆解析結果を式(4)に用いて、拘束圧一定排水せん断試験の弾・粘塑性挙動 v を予測している。予測値 ε_v の2本のラインは弾・粘塑性挙動 v の白黒どちらともプロットを挟み込み、 Λ , N' が適当に選ばれば v を ε_v で説明できることがわかる。

図4では、拘束圧一定排水せん断試験の弾・粘塑性挙動 ε (式(4))を予測している。この図より、予測値 ε_s の2本のラインは、弾・粘塑性挙動 ε のせん断後期の挙動を予測できていないことがわかる。

3. おわりに 限界状態線の傾き M に顕著な時間依存性がないと考えれば、 $\dot{q} = \text{const.}$ 試験では供試体は強度 q が小さい応力経路ほど早く破壊する。一方、 $\dot{\eta}' = \text{const.}$ 試験では供試体は応力経路に関わらず同時に破壊する。前者は局部せん断破壊を生じるときの時間効果の議論であり、後者は全般せん断破壊を生じるときの時間効果の議論であることがわかる。すなわち、本研究は試験経路の違う複数の均質な供試体のせん断挙動を比較して不均質性に関わるひずみの局所化のメカニズムを調べるためのアプローチともなっている。

参考文献 1) 三隅, 福本, 佐藤, 山下, 岩切, 松崎: 繰返し正規圧密粘土の降伏曲線の時間依存性挙動, 第26回土質工学研究発表会平成3年度発表講演集第3部, pp. 653-656

2) Sekiguti, H. and H. Ohta: Induced anisotropy and time dependency in clays. Constitutive equations of Soils, Specially Session 9, Ninth Int. Conf. SMFE, Tokyo, PP. 229-238, 1977

3) 飯塚敦: 軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1988

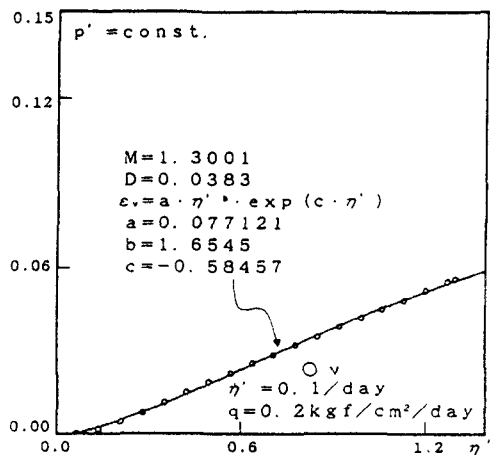


図1 vへの弾塑性モデルのあてはめ

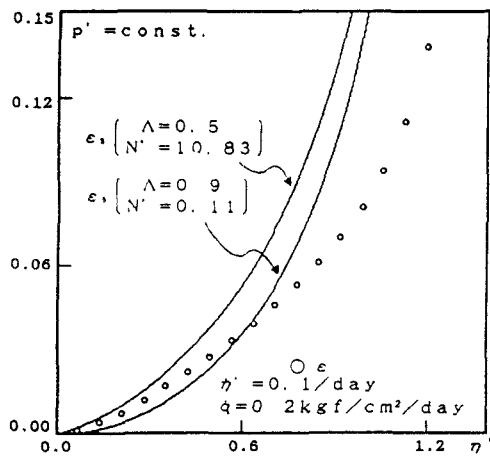


図2 εへの弾塑性モデルのあてはめ

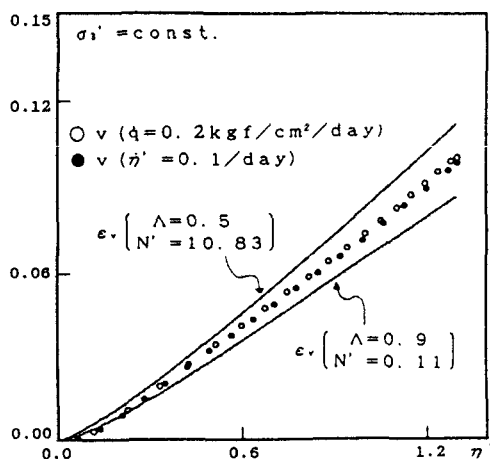


図3 弾・粘塑性挙動vの予測

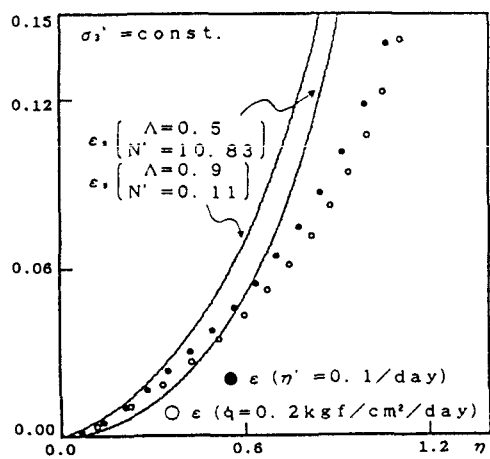


図4 弾・粘塑性挙動εの予測

$$\begin{aligned}
 p' &= \text{const.} \\
 v &= v^* = \alpha \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\dot{v}_0 \cdot t}{\alpha} \cdot \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right\} \\
 \epsilon &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{N'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dq \right. \\
 &\quad + \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{v^*}{\alpha} \right) \right\} \cdot \frac{D}{p'} \cdot \frac{1}{M - \eta'} \cdot dq \\
 &\quad \left. + \dot{v}_0 \cdot \exp \left(\frac{f - v^*}{\alpha} \right) \cdot \frac{1}{M - \eta'} \cdot dt \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_1' &= \text{const.} \\
 v &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dp' \right. \\
 &\quad + \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{v^*}{\alpha} \right) \right\} \cdot \frac{D}{p'} \cdot \left\{ (M - \eta') \cdot dp' + dq \right\} \\
 &\quad \left. + \dot{v}_0 \cdot \exp \left(\frac{f - v^*}{\alpha} \right) \cdot dt \right] \\
 \epsilon &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{N'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dq \right. \\
 &\quad + \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{v^*}{\alpha} \right) \right\} \cdot \frac{D}{p'} \cdot \left\{ dp' + \frac{1}{M - \eta'} \cdot dq \right\} \\
 &\quad \left. + \dot{v}_0 \cdot \exp \left(\frac{f - v^*}{\alpha} \right) \cdot \frac{1}{M - \eta'} \cdot dt \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p' &= \text{const.} \\
 \epsilon_v &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \frac{M}{\psi + \eta'} \cdot dq \right] \\
 \epsilon_s &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{N'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dq \right. \\
 &\quad \left. + \frac{D}{p'} \cdot \frac{1}{\psi} \cdot \frac{M}{\psi + \eta'} \cdot dq \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_1' &= \text{const.} \\
 \epsilon_v &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dp' \right. \\
 &\quad \left. + \frac{D}{p'} \cdot \left(\frac{M}{\psi + \eta'} \cdot \psi \cdot dp' + \frac{M}{\psi + \eta'} \cdot dq \right) \right] \\
 \epsilon_s &= \Sigma \left[\frac{D}{p'} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{N'} \cdot \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) \cdot dq \right. \\
 &\quad \left. + \frac{D}{p'} \cdot \left(\frac{M}{\psi + \eta'} \cdot dp' + \frac{1}{\psi} \cdot \frac{M}{\psi + \eta'} \cdot dq \right) \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\psi = D \cdot M \cdot \left(\frac{d\epsilon_v}{d\eta'} \right) \cdot \eta' \quad \text{at } p' = \text{const.} \quad (5)$$