

大阪大学工学部 正 会 員 阿 部 信 晴
大阪大学大学院 学生会員 ○隅 水 友 顕

1. まえがき

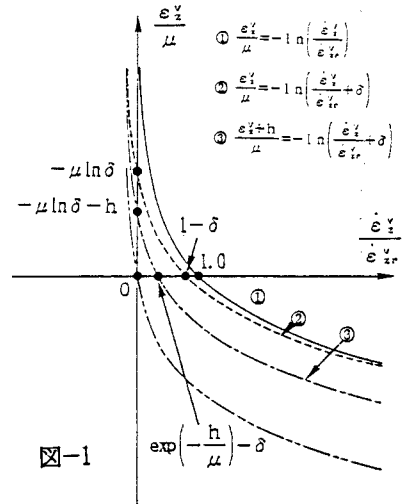
粘土の時間-負荷履歴を考慮するために、流動曲面モデルに履歴変数を導入した流動曲面履歴変数モデル (flow surface history variable model, FSHVモデル) を提案している。本報告では、流動曲面履歴変数モデルの構成仮定を示すとともに適用性を検討する。

2. 流動曲面履歴変数モデル

流動曲面モデルは基準ひずみ速度を含むクリープ則と基準特性に基づいている。図-1に示すクリープ則(①, ②)からそれぞれ次式の流動関数が導かれている。

$$F = \mu \ln \left[1 + \frac{\dot{\epsilon}_{zr}}{\mu} t \exp \left(\frac{f}{\mu} \right) \right] - \epsilon_{zp} = 0 \quad (1)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_{zr} t \right) \right\} \exp \left(\frac{f}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_{zr} t \right) \right] - \epsilon_{zp} = 0 \quad (2)$$



ここに、 $\dot{\epsilon}_{zr}$ 、 μ 、 δ ：粘性パラメータ、 f ：塑性ひずみ、 ϵ_{zp} ：粘塑性ひずみ、 t ：時間である。流動曲面モデルはこれらの流動関数を降伏関数とする弾／粘塑性モデルであり、負荷-除荷基準が存在し、過圧密領域、正規圧密領域はそれぞれ弾性域、弾粘塑性域に対応している。すなわち、弾／粘塑性モデルでは過圧密領域での時間依存性を考慮することができない。しかし、過圧密領域における粘土の時間依存性はよく知られており、特に自然堆積粘土の圧密降伏応力近傍での長期沈下などでは顕著である。

過圧密領域から正規圧密領域での現実的な滑らかな遷移(弾粘塑性遷移過程=降伏)を表現するために、履歴変数 h を導入して、図-1に示すクリープ則(③)を仮定する。基準特性を仮定し、負荷の瞬間に粘塑性応答は存在しないとして、クリープ則を積分することにより流動曲面履歴変数モデルの流動関数が求められる。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_{zr} t \right) \right\} \exp \left(\frac{f-h}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_{zr} t \right) \right] - \epsilon_{zp} = 0 \quad (3)$$

また、粘性ひずみは次式で与えられる。

$$\epsilon_{zr} = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left[1 - \delta \exp \left(-\frac{f-h}{\mu} \right) \right] \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_{zr} t \right) \right\} \right] - h \quad (4)$$

(4)式右辺第1項を $\bar{\epsilon}_{zr}$ として、解析更新時の履歴変数 h' とする。流動曲面履歴変数モデルでは、常に弾性ひずみと粘塑性ひずみが存在すると仮定されているので、過圧密状態、正規圧密状態の両状態に対して(3)式が用いられる。履歴変数 h は内部ひずみという物理的意味を持っているが、図-1から明かなように $\exp(-h/\mu) - \delta \geq 0$ でなければならない。履歴変数 h がこの値より大きくなると、粘土は完全弾性状態にあるものとする。

3. 数値計算例

1) 圧密降伏応力近傍での定応力载荷圧密試験

初期応力 0.1kgf/cm^2 から圧密応力 0.4kgf/cm^2 まで荷重増分 1 で24時間载荷の標準圧密試験を行い、その後圧密荷重増分 $\Delta\sigma_z=0.2\sim0.8\text{kgf/cm}^2$ を载荷して70日間圧密するという試験の解析結果が図-2(a), (b)である。図-2(a)の破線はひずみ速度 $0.01\%/min$ での定ひずみ速度圧密試験(解析)の結果である。また、標準圧密試験(解析)から求めた圧密降伏応力は 0.95kgf/cm^2 である。圧密降伏応力に近い過圧密領域においてクリープ沈下が生じており、現実の圧密試験に近い結果となっている。圧密降伏応力以下の応力を载荷した場合、载荷時間が長くなると、終了したかにみえた沈下が再び始まるという挙動を示すことが分かる。すなわち圧密降伏応力に達しない圧密応力でも長時間圧密を行えば圧密降伏が生じる可能性のあることを示すものである。

2) 定ひずみ速度圧密試験における圧密降伏挙動

図-3(a), (b)はFSHVモデルによる定ひずみ速度圧密試験($\dot{\epsilon}_z = 1.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^{-6}\%/min$)の解析結果である。ひずみ速度が大きくなると、応力~ひずみ曲線は右へ動いていく圧密降伏のひずみ速度依存性が適切に表現されている。これは圧密降伏のひずみ速度依存性である。また、ひずみ速度をいくら小さくしてもそれ以上左へ動かない限界の応力~ひずみ曲線が存在することが分かる。これは図-3(b)に示すように、ひずみ速度が小さくなると圧密降伏応力がある一定値に収束することに対応しており、自然堆積粘土の圧密降伏応力~ひずみ速度関係では一般的に認められるものである。

4. まとめ

計算例として示した結果は、これまでの実験等において観察されていた圧密降伏挙動の傾向とよく一致している。流動曲面履歴変数モデルによってかなり現実的な圧密解析が可能であることが明らかとなった。

【参考文献】1)阿部他：一次元圧密における载荷時間の影響について、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、(平成2年) 2)阿部他：履歴変数モデルによる自然堆積粘土の一次元圧密解析、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集(平成5年) 3)阿部他：弾粘塑性モデルによる粘土の圧密降伏挙動解析、平成5年度土木学会関西支部年次学術講演会

