



研究ノート

正規圧密粘土の弾粘塑性構成式

松井 保* 阿部 信晴**

1. はじめに

粘土の変形・強度特性が時間依存性であることは良く知られている。したがって、粘土地盤のクリープ破壊問題等を境界値問題として扱うには、ダイレイタンス特性を含む粘土の塑性特性と時間依存特性の相互作用を考慮した弾粘塑性構成式を導き、多次元圧密解析を行う必要がある。

粘土の弾粘塑性構成式として、①超過応力理論によるもの、②流動曲面理論によるもの、③エンドクロニック理論によるものなど、いくつかの構成式が提案されているが、ここでは、著者等が提案している流動曲面理論にもとづく正規圧密粘土の弾粘塑性構成式について紹介することにする。

2. 流動曲面理論

流動曲面理論¹⁾は、弾塑性理論と同様な理論構成の中に粘性効果を表現する内部変数あるいは時間依存性の内部変数を導入することによって、時間とともに変化する降伏曲面という概念にもとづいて構成される弾粘塑性理論である。このような曲面は流動曲面 (flow surface) と呼ばれ、次式の流動関数によって表現される。

$$f = f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^{vp}, \alpha, \beta) = 0 \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij} は有効応力カテンソル、 ϵ_{ij}^{vp} は粘塑性ひずみテンソル、 α はひずみ硬化パラメータ、 β は時間依存性を有するスカラーパラメータである。流動曲面理論では、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$

の和で与えられる。すなわち、

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$$

また、粘塑性ひずみ速度は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

ここに、 Λ は正のスカラーパラメータである。したがって、ひずみ速度は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = H_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl} + h \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \dot{\sigma}_{mn} + \frac{\partial f}{\partial \beta} \dot{\beta} \right) \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

ここに、

$$h = - \left[\frac{\partial f}{\partial \epsilon_{kl}^{vp}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \bar{\alpha} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

H_{ijkl} : 弾性応力-ひずみテンソル

3. 正規圧密粘土の流動曲面モデル

正規圧密粘土を粘塑性体積ひずみをひずみ硬化パラメータとする等方硬化弾粘塑性体と仮定して、流動曲面モデルを導く²⁾³⁾。このために、正規圧密粘土のクリープ特性のうち次の2つを基本特性として考慮する。

- ① 正規圧密粘土の体積クリープは対数クリープ則に従う。
- ② 正規圧密粘土は非排水クリープにおいて上限降伏値を有する (すなわち、上限降伏値以下のクリープ応力では非排水クリープ破壊は生じない)。

基本特性をモデルに導入するために、粘性体積ひずみ v^v に関する次式を仮定する。

$$\frac{v^v}{\mu} = -\ln \left(\frac{\dot{v}^v}{\dot{v}_r^v} + \delta \right) \quad (6)$$

ここに、 $\dot{v}_r^v$ は基準粘性体積ひずみ速度、 μ 、 δ は材料定数である。

粘塑性体積ひずみ v^{vp} は塑性体積ひずみ v^p と粘性体積ひずみ v^v の和で与えられるとし、さらに、負荷の瞬間においては粘塑性体積ひずみは

*松井 保 (Tamotsu MATSUI), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 教授, 工学博士, 土質基礎工学

**阿部信晴 (Nobuharu ABE), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 助教授, 工学博士, 土質基礎工学

生じないと仮定して(6)式を積分することにより、次式を得る。

$$v^p = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right\} \right. \\ \left. \exp \left(\frac{v^p}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right] \quad (7)$$

等方正規圧密粘土の準静的状態における力学挙動が original Cam-clay model⁴⁾によって表現されるとすれば、塑性体積ひずみは次式で与えられる。

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left\{ \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{\eta}{M} \right\} \quad (8)$$

ここに、 λ 、 κ 、 e_0 はそれぞれ圧縮指数、膨潤指数、初期間隙比である。 p 、 p_0 は平均有効主応力およびその初期値である。そして η 、 M は応力比および破壊時の応力比である。(8)式を(7)式に代入すれば、等方正規圧密粘土の流動関数が次式で与えられる。

$$f = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right\} \right. \\ \left. \exp \left[\frac{\lambda - \kappa}{\mu(1 + e_0)} \left\{ \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{\eta}{M} \right\} \right] \right. \right. \\ \left. \left. + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right] \right] - v^p = 0 \quad (9)$$

表-1 Haney clay の材料定数

λ	κ	e_0	M	G	μ	δ	$\dot{v}_r^v$
0.20	0.031	0.896	1.29	600	0.004	0.168	8.0×10^{-6}
					[kgf/cm ²]		[min ⁻¹]

4. 数値計算例

上述した流動曲面モデルによって等方正規圧密粘土のひずみ速度効果、クリープ、応力緩和、二次圧密などが定性的に良く表現されることは既に確かめられているが^{5,6)}、ここでは Vaid・Campanella によって行われた不攪乱 Haney clay の非排水三軸試験結果⁷⁾に対する数値計算例を示す。不攪乱 Haney clay の材料定数は表-1に示されている。図-1～3は非排水クリープ試験について実験結果と計算結果を比較したものであるが、両者は比較的良い一致を示している。ただ、図-2からわかるように、クリープ破壊に到らないケースにおいて計算結果の軸ひずみ速度は少し早く減少しすぎるよう

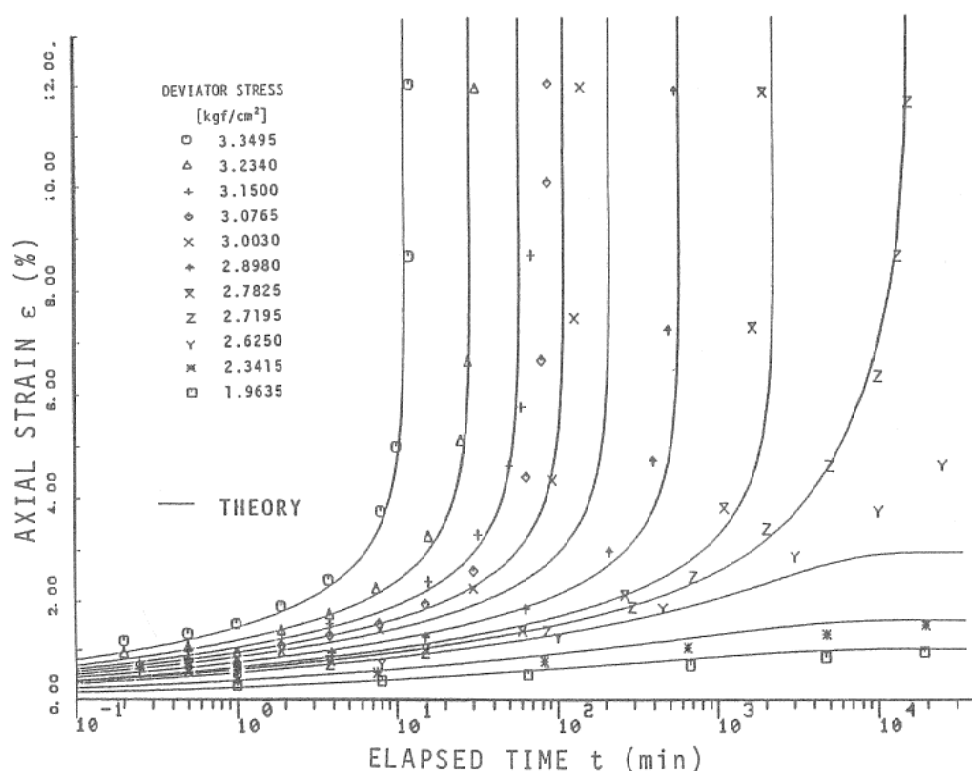
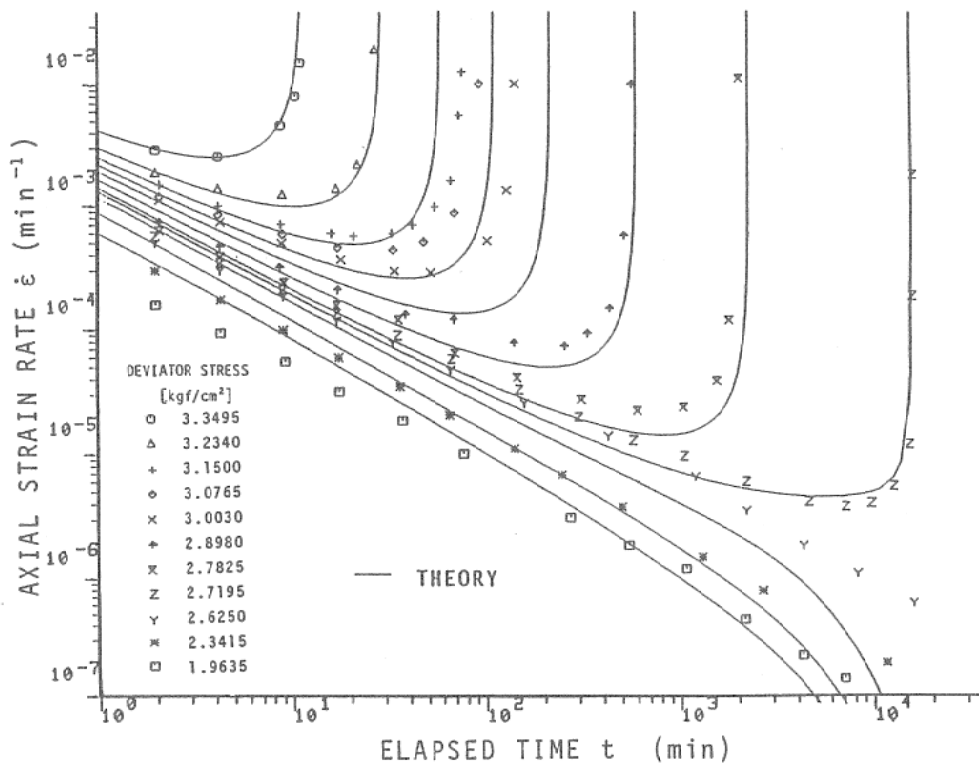
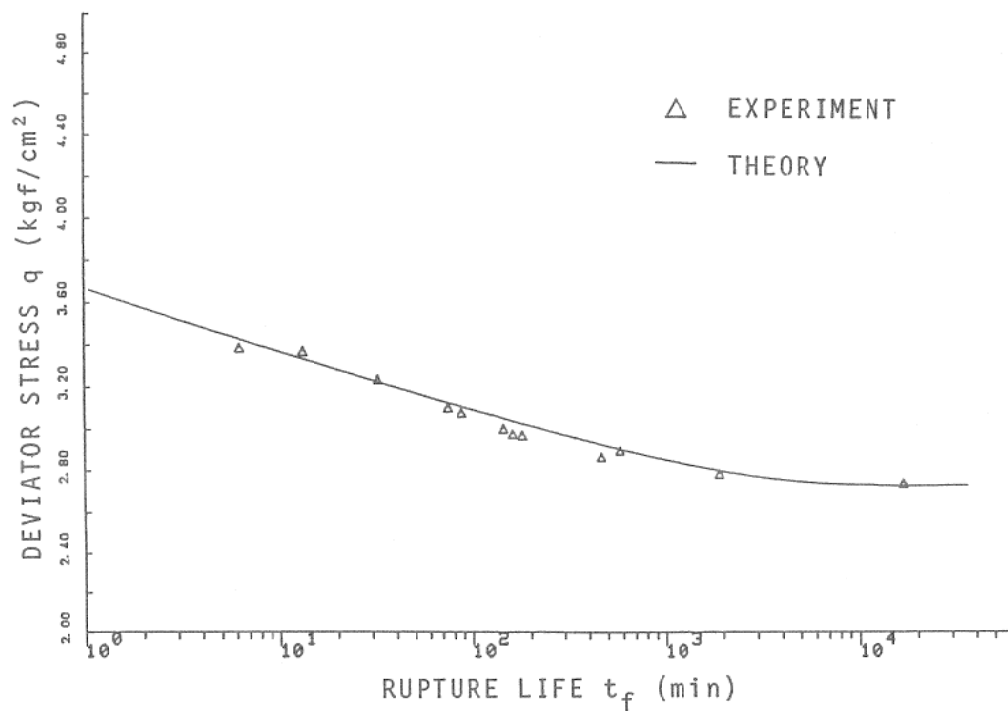


図-1 三軸非排水クリープにおける軸ひずみ-時間関係



図一 三軸非排水クリープにおける軸ひずみ速度—時間関係



図一 三軸非排水クリープにおけるクリープ応力—破壊時間関係

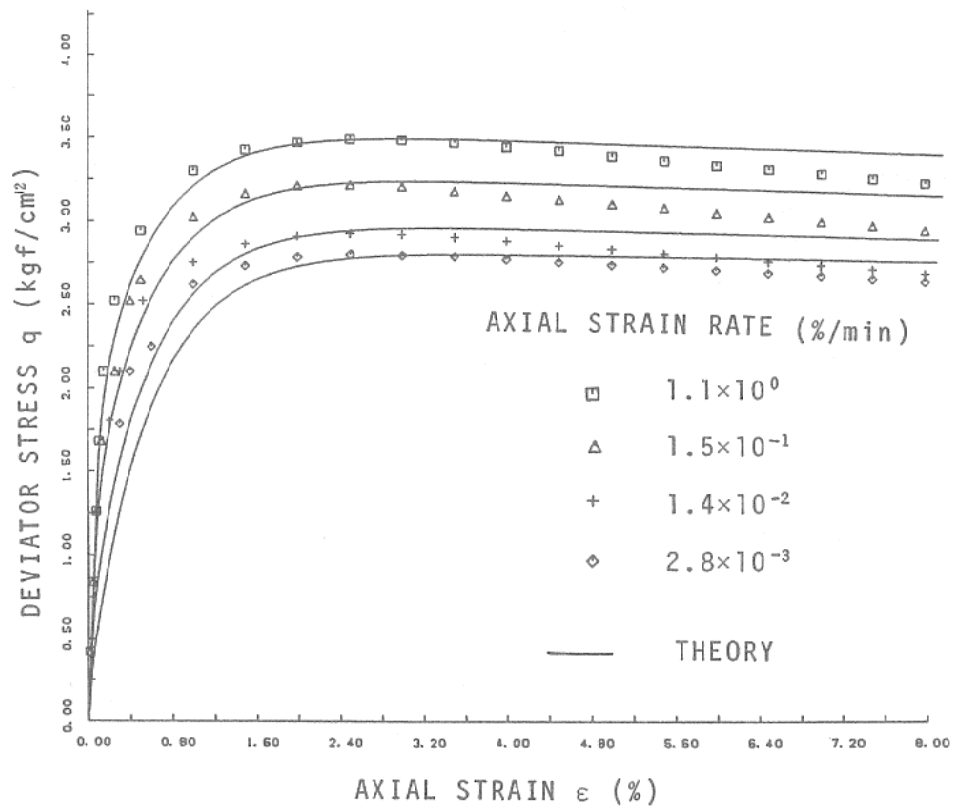


図-4 定ひずみ速度試験における軸差応力-軸ひずみ曲線

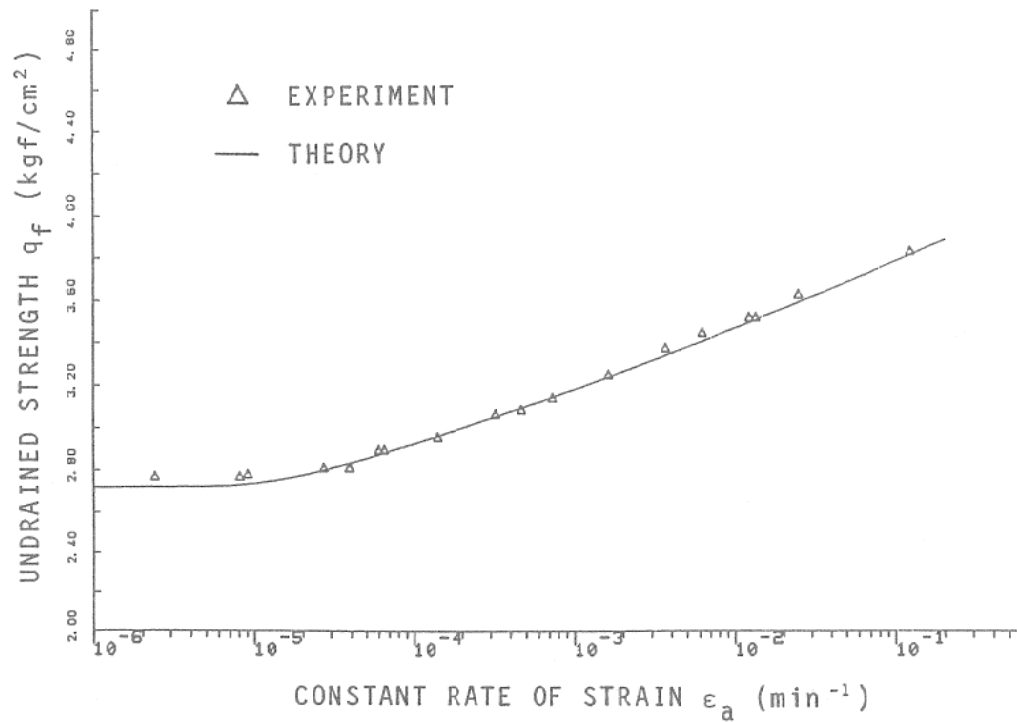


図-5 定ひずみ速度試験における非排水強度-ひずみ速度関係

文 献

ある。図-4～5は一定軸ひずみ速度三軸圧縮試験について実験結果と計算結果を比較したものである。図-4において、軸ひずみ速度の小さいケースでは計算結果の曲線の立ち上がりが若干ゆるやかになる傾向があるものの、ピーク値そのものには良い対応がある。また、図-3, 5から明らかなように、上限降伏値以下のクリープ応力ではクリープ破壊は生じないし、一定軸ひずみ速度試験において軸ひずみ速度をいくら小さくしても非排水強度は上限降伏値以下になることはない。これらのモデル挙動は実験結果と一致している。このことは、提案モデルによって正規圧密粘土の降伏値特性が的確に評価されていることを示すものである。

5. おわりに

以上、提案している正規圧密粘土の弾粘塑性構成式について簡単に紹介した。今後この構成式を応力経路履歴を受けた粘土、すなわち、過圧密粘土に対する構成式に拡張するとともに、これらを境界値問題に適用して粘土地盤のクリープ破壊現象を解明して行きたいと考えている。

- 1) Olszak, W. and P. Perzyna (1966)
The constitutive equations of the flow theory for a non-stationary yield condition, Proc. 11 th Int. Congr. Appl. Mech., pp. 545-553
- 2) Matsui, T. and N. Abe (1985)
Elasto / viscoplastic constitutive equation of normally consolidated clays based on flow surface theory, Proc. 5th Int. Conf. Num. Methods Geomech., pp. 407-413
- 3) Matsui, T. and N. Abe (1986)
Flow surface model of viscoplasticity for normally consolidated clay, Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geomech., pp. 157-164
- 4) Roscoe, K. and J. Burland (1986)
On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay, Engineering Plasticity (ed. J. Heyman and F. A. Leckie), pp. 535-609
- 5) Matsui, T. and N. Abe (1985)
Undrained creep characteristics of normally consolidated clay based on flow surface model, Proc. 11 th Int. Conf. Soil Mech. Founds Engng, Discussion Session IA, pp. 140-143
- 6) 松井・阿部・林・中野 (1986)
流動曲面モデルに基づく正規圧密粘土の時間依存特性, 第21回土質工学研究発表会講演集 (2分冊の1), pp. 465-466
- 7) Vaid, Y. and G. Campanella (1977)
Time-dependent behavior of undisturbed clay, Jour. GT Div., ASCE, No. GT 7, pp. 693-709