

大阪大学大学院 正会員 阿部 信晴
大阪大学大学院 学生員 富江 洋
大阪大学工学部 学生員 ○上本 勝広

1. まえがき

現実の材料の力学特性はクリープ、応力緩和に代表される時間依存性であり、このような挙動を記述するためには塑性変形と時間依存性変形の両者を考慮する非弾性構成モデルが必要である。時間依存性塑性体（あるいは速度依存性塑性体）の構成モデルは現在までに数多く提案されているが、その定式化をひずみ速度の構成にもとづけば、(a) 粘弾性理論の非線形拡張モデル、(b) 粘弾塑性モデル、(c) 弾粘塑性モデル、(d) 弾塑性粘塑性モデルに分類することができる。

地盤材料についても様々な時間依存性構成モデルが提案されており、最近ではこれらのモデルの基本構造・特性に関する議論がなされている。本報告では、弾粘塑性理論にもとづくクリープポテンシャルモデルと流動曲面モデルのモデル特性について検討している。

2. クリープポテンシャルモデル

時間依存性あるいは温度依存性の塑性理論の開発の試みの中から降伏条件や負荷－除荷基準は塑性理論にとって不可欠の要件でないことが明らかになり、どのような応力状態においても弾性ひずみとクリープひずみ（粘塑性ひずみ）が存在するというクリープポテンシャル理論が提案された。この理論は、非弾性変形の効果を一つの非弾性ひずみ速度によって表現することから統一理論(unified theory)、また弾粘塑性遷移過程を含む材料の硬化挙動を状態変数によって記述することから状態変数理論(state variable theory)とも呼ばれている。

クリープポテンシャル理論では、
ひずみ速度の構成 $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^c$ (1)

クリープ流動則 $\dot{\epsilon}_{ij}^c = \hat{f}(\sigma_{ij}, T, s_i, \dots, s_m) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ (2)

状態変数の移行式 $\dot{s}_n = h(\sigma_{ij}, T, s_i, \dots, s_m)$ (3)

が仮定されている。ここに、 $\dot{\epsilon}_{ij}^e, \dot{\epsilon}_{ij}^c$:弾性およびクリープひずみ速度、 $\hat{f}$:硬化関数、 g :クリープポテンシャル、 σ_{ij} :有効応力、 T :温度、 s_n :状態変数

粘土のクリープポテンシャルモデル

提案する粘土のクリープポテンシャルモデルではクリープひずみ速度は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \hat{f}(\sigma_{ij}, v^c) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{v}_r^c \left\{ \exp \left(\frac{f - v^c - h_c}{\mu} \right) - \delta \right\} P_{ij} \quad (4), \quad P_{ij} = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

ここに、 f :ひずみ関数、 p :平均有効応力、 v^c :クリープ体積ひずみ、 $\mu, \dot{v}_r^c, \delta$:クリープパラメータ、 h_c :履歴パラメータ、 $\langle \cdot \rangle$:Macaulay bracket

接線剛性法

クリープポテンシャルモデルによる解析では解の安定性を向上させるために接線剛性法を用いる。

クリープポテンシャルモデルの有効応力増分～ひずみ増分関係（接線剛性関係）は、次式で与えられる。

$$\Delta \sigma = \left[1 + \theta \Delta t D (1 - \xi)^{-1} \frac{\partial \dot{\epsilon}^c}{\partial \sigma} \right]^{-1} D [\Delta \epsilon - \Delta t (1 - \xi)^{-1} \dot{\epsilon}_i^c] \quad (7)$$

$$\xi = \theta \Delta t \frac{\partial \dot{\epsilon}^c}{\partial v^c} L^T \quad (8), \quad L^T = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (9)$$

ここに、 $\Delta \sigma$:有効応力増分、 $\Delta \epsilon$:ひずみ増分、 θ :時間積分パラメータ、 Δt :時間増分、 D :弾性構成マトリックス

3. 流動曲面モデル

流動曲面モデルは非粘性の弾塑性モデルと同じ理論構成の中に時間依存性の変数を導入することにより、時間とともに変化する負荷曲面の概念に基づいている。これまでに提案されている粘土の流動曲面モデルは基本的には定応力場でのクリープ則を時間積分して変動応力場に拡張した時間硬化モデルであり、ひずみ速度履歴効果などの急激な負荷変動時の応答を正確に表現することができないことが明らかになっている。

流動曲面履歴変数モデル

このため、履歴変数を導入した流動曲面履歴変数モデルが提案されている。流動曲面履歴変数モデルの流動関数 F と履歴変数 h は、それぞれ次式で表される。

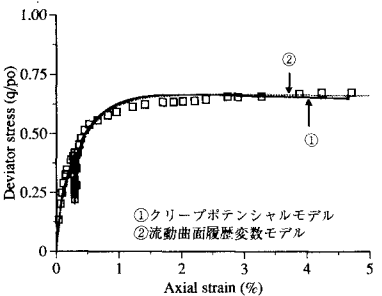


図1 セン断応力-軸ひずみ関係

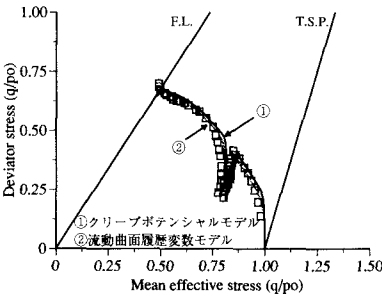


図2 応力経路

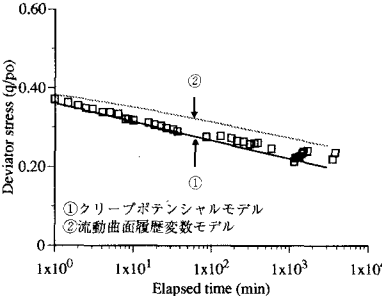


図3 セン断応力-緩和時間関係

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^* t \right) \right] \exp \left(\frac{f - h_0}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^* t \right) \right] - v^p = 0 \quad (10)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left[1 - \delta \exp \left(-\frac{f + h_0}{\mu} \right) \right] \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^* t \right) \right] \right] \quad (11)$$

ここに、 v^p : 粘塑性体積ひずみ、 t : 時間変数である。

流動曲面履歴変数モデルの更新手法

流動曲面履歴変数モデルを用いて時間-負荷履歴効果を含む粘土の挙動解析を行うために、更新手法(updating procedure)を適用する。

- (1) 後続負荷に対して時間変数を更新する。
- (2) 負荷直前の応力を後続負荷時の初期値とする応力の初期化を行う。
- (3) 後続負荷直前までに生じた粘性体積ひずみを後続負荷時の履歴変数 h_0 として更新する。

4. 非排水三軸試験解析

非排水三軸試験試験結果に基づいてクリープポテンシャルモデル(CP モデル)と流動曲面履歴変数モデル(FSHV モデル)のモデル特性を検討する。等方圧密された正規圧密粘土が対象であるので、(4)、(10)式中のひずみ関数 f としてオジナルカムクレイモデルによる次式を用いている。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{\eta - \eta_0}{M} \right] \quad (6)$$

また、試験に用いられている藤の森粘土の材料パラメータを表 1 に示している。

1) 応力緩和試験/応力緩和試験(中井他, 1987)では定ひずみ速度せん断→応力緩和→定ひずみ速度せん断が行われている。軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_s = 5.5 \times 10^{-2} \%$ /min で $q/p_0 = 0.4$ まで定ひずみ速度せん断し、約 2 日間(3,000 min)軸方向変位を拘束して応力緩和を行い、その後再び同じ速度でせん断している。FSHV モデルによる解析では定ひずみ速度せん断後と応力緩和後に更新手法を用いている。図 1～3 は応力-ひずみ関係、応力経路、応力緩和時の軸差応力の経時変化について解析結果と実験結果を比較したものである。両モデルの解析結果は実験結果と良く一致しているが、FSHV モデルが応力緩和時に大きめの軸差応力値を与えている。

2) 多段階クリープ試験/多段階クリープ試験は定応力速度せん断-クリープ載荷を繰り返し定応力せん断-クリープ試験(三宅他, 1988)である。まず、第 1 段階で定応力速度 $\dot{q} = 0.102 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ で軸差応力 $q = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ ($q/p_0 = 0.4$) までせん断した後、24 時間のクリープを行う。第 2 段階以降では同じ応力速度で軸差応力 $q = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ($q/p_0 = 0.1$) を載荷した後、24 時間のクリープを行い、これを 3 回繰り返して粘土を破壊させている。FSHV モデルによる解析では定応力せん断後とクリープ後に更新手法を用いている。図 4 は応力経路について解析結果と実験結果を示したものである。両モデルの結果は類似しており実験結果とも良く対応している。

表 1 材料パラメータ

λ	κ	M	e_0	G_0	P_0	μ	$\dot{v}_v^*$	δ
				(kgf/cm^2)	(kgf/cm^2)		(1/min)	
0.117	0.026	1.36	1.32	2.00.0	2.0	0.001	7.0×10^{-7}	0.001

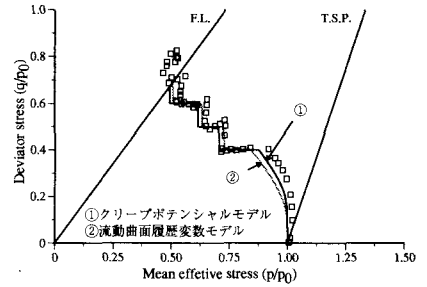


図 4 応力経路

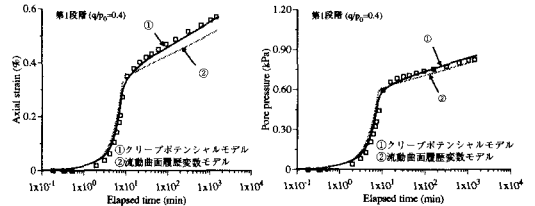


図 5-(a) 軸ひずみ-時間関係 図 6-(a) 間隙水圧-時間関係

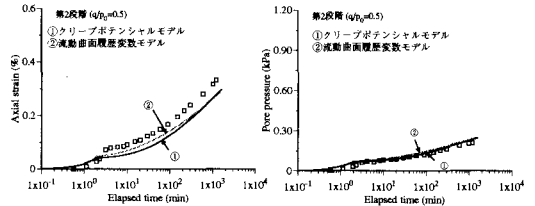


図 5-(b) 軸ひずみ-時間関係 図 6-(b) 間隙水圧-時間関係

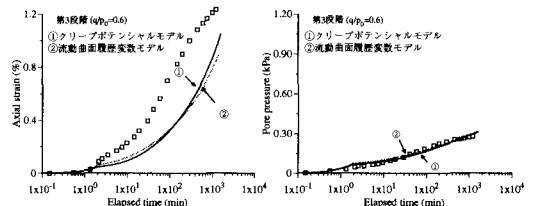


図 5-(c) 軸ひずみ-時間関係 図 6-(c) 間隙水圧-時間関係

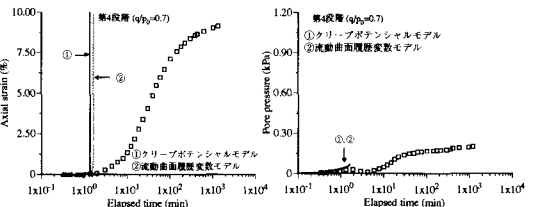


図 5-(d) 軸ひずみ-時間関係 図 6-(d) 間隙水圧-時間関係

5. まとめ

非排水三軸試験試験結果に基づいて CP モデルと FSHV モデルのモデル特性を検討し、以下の点が明らかとなった。

- (1) CP モデルによって粘土の非排水せん断時の時間-負荷履歴を表現することができる。
- (2) 更新手法によって、FSHV モデルは CP モデルと同様の挙動を表現できる。

参考文献

- (1) 中井・都築・石川・三宅(1987) 三軸圧縮・伸張条件下の粘土の時間効果特性, 第 22 回土質工学研究発表会発表概要集, pp.411-414.
- (2) 三宅・中井・森木・西村(1988) 三軸圧縮・伸張条件下の粘土の非排水クリープ挙動とその解析, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集 3-239, pp.520-521.