

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：33910

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14033

研究課題名(和文) 正規圧密土から過圧密土・自然堆積土までの時間効果特性の一貫性のある新たな表現

研究課題名(英文) Consistent modeling of time-dependent behavior from normally consolidated soil to overconsolidated and naturally deposited soils

研究代表者

中井 照夫 (NAKAI, Teruo)

中部大学・工学部・客員教授

研究者番号：00110263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の非定常流動曲面型や超過応力型の粘塑性理論を援用した地盤材料の粘塑性モデルは非時間依存性モデルとの整合性や客観性等に問題点を含むとともに、正規圧密土から自然堆積土の時間効果特性を包括的に説明できるものではなかった。本研究では正規圧密土から自然堆積土までの非時間依存力学挙動を包括的に説明できる従来のモデルを、圧密時の $e$ - $\ln p$ 関係の正規圧密線がひずみ速度によって上下にシフトするという周知の実験事実と2次圧密係数だけを使って、時間依存性を顧慮できるモデルに拡張した。これらの1Dおよび3Dの時間依存性モデルを地盤有限要素導入し、地盤の変形解析に適用した。

研究成果の概要(英文)：Traditional visco-plastic models for geomaterials based on non-stationary flow surface or over-stress theories have problems on the consistency with inviscid models and/or their objectivity, and cannot describe uniquely time-dependent behavior from normally consolidated soil to over consolidated and naturally deposited soils

In the present study, utilizing well-known experimental evidence that normally consolidated line on  $e$ - $\ln p$  relations shifts upward and downward depending on the strain rate and the secondary compression coefficient, the models which can describe various inviscid behaviors of normally consolidated, over consolidated and naturally deposited soils are extended to viscid models. Implementing these 1D and 3D viscid models into finite element programs, some deformation analyses of grounds are carried out.

研究分野：地盤工学

キーワード：クリープ 時間効果 構成モデル 応力緩和 ひずみ速度 地盤材料 有限要素法 地盤の変形

1. 研究開始当初の背景

地盤工学において、地盤材料の時間効果特性が地盤の挙動に影響することが多くある。その結果、これまでに地盤材料の時間効果特性に関する実験的、理論的研究が継続的に行われている。しかし、時間効果特性を考えたこれまでの多くの構成モデルは、例えば正規圧密に限るとか過圧密に限るなど、対象とする地盤材料を限定してモデル化され、また時間効果特性を考えない弾塑性モデルとは別物(例えば、非定常流動曲面型モデルや超過応力型モデル)としている。その結果、種々の時間依存性挙動を包括的に説明でき、非時間依存性の弾塑性モデルと整合性があり、且つその理論構造が明快なモデルの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究ではこれまで取り組んできた地盤材料の諸特性を簡単且つ精緻に表現するモデル化法の一つの応用として、1次元および3次元弾塑性モデルを既往の粘塑性論を使うことなく時間効果特性を考慮できるモデルに拡張する。そして、そのパフォーマンスを正規圧密粘土、過圧密粘土、自然体積粘土の1次元および3次元挙動の解析を通して検証し、開発したモデルの妥当性と適用性を検証する。

3. 研究の方法

地盤材料の時間依存性挙動はこれまで既往の非定常流動曲面型や超過応力型の粘塑性理論を援用してモデルされてきた。しかし、これらの粘塑性理論に基づくモデルはそれぞれ客観性等の問題点を有するだけでなく、同じ土であっても状態(密度や年代効果等)によって異なるモデルや異なる材料パラメータを使う必要がある。本研究では、周知の2次圧密係数と下負荷面の概念だけを使って、正規圧密土から過圧密土・自然堆積土までの種々の時間依存性挙動を簡単且つ統一的に説明できる斬新な考え方を提案した。なお、提案する方法を用いたモデルは時間効果特性を考えない弾塑性モデルとも整合性を有するものであり、提案手法を使えばいかなる弾塑性モデルも時間効果特性を合理的に考慮できるモデルに簡単に拡張できる。

よく知られている1次元の  $e - \ln \sigma$  関係で説明する。図 - 1 の I 点および P 点は初期および現在の空隙比と応力状態を表す。また、下添字 0 の付く変数は初期値を意味する。同図から、ひずみ速度により正規圧密線(NCL)はシフトするが、次式が常に成り立つことが容易に判る(ここに、 $\lambda, \kappa$  は圧縮および膨潤指数、上添え字  $e, p$  は弾性および塑性成分を表す)。

$$(-\Delta e)^p = \{ (e_{N0} - e_N) - (\rho_0 - \rho) \} - (-\Delta e)^e \\ = (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) \dots (1)$$

同図の初期および現 NCL の位置  $\psi_0, \psi$  はその

時のひずみ速度によって決められ、そのシフト量  $(\psi - \psi_0)$  は正規圧密土の2次圧密係数  $\lambda_e$  の関数で表せる。また、空隙比の NCL からの距離  $\rho$  は密度を表し、これを使って過圧密の影響を考慮する( $\rho=0$  は正規圧密で、 $\rho$  が大きくなるに従い密度大)。更に、自然堆積土の高張り(構造)はボンディング効果によってできると考えられるので、ボンディング効果を等価な仮想上の密度増加  $\omega$  に置き換える。

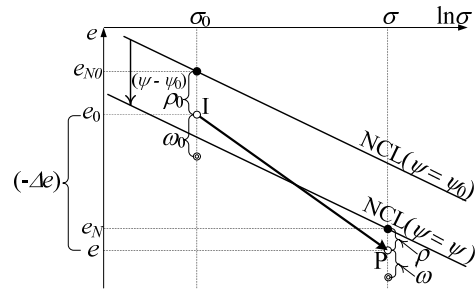


図 - 1  $e - \ln \sigma$  関係によるモデルの説明図

土が如何なる状態にあっても、塑性ひずみ(空隙比)が生じると、ボンディング効果が小さくなりながら、その時ひずみ速度に対応した正規圧密線(NCL)に近づくように変形する( $\rho$  が 0 に近づく)と考えられる(下負荷面の概念)。したがって、 $\rho$  の増分を決める発展則  $d\rho$  は  $\rho$  および  $\omega$  の単調増加関数  $G(\rho), Q(\omega)$  を使って  $d\rho = -\{G(\rho)+Q(\omega)\}d(-e)^p$  のように表現できる。この発展則を考えた上で(1)式の増分をとると、塑性空隙比増分は次式の簡単な形で与えられる。

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} \\ \cong \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{(-\dot{e})^{p^*}}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} dt \quad (2)$$

ここに、 $(-\dot{e})^{p^*}$  は 1step 前の既知の空隙比の変化速度を使うことになるが、下負荷面の考え方により、それによって生じる誤差は増分計算の過程で自動的に修正される。(2)式で  $Q(\omega)$  の項を無視するとボンディングのない土の、 $G(\rho)$  の項を無視すると正規圧密土のモデルとなる。また、右辺第 2 項( $dt$  の項)を無視すると時間効果特性を考えない弾塑性モデルに帰着する。その結果、提案する手法を使えば、正規圧密土から構造化した自然堆積土までの時間依存性挙動を同じ枠組みで且つ共通の材料パラメータを使って説明可能である。

このように、提案手法はその考え方に合理性があり、多くの粘塑性モデルが持つ問題点がない上に、適用範囲が広く、余分な仮定を設けることなく簡単に定式化できるものである。

すでに提案している修正応力  $t_{ij}$  の考え方を使えば、ここでの 1次元モデルは容易に相異なる 3 主応力下で有効な多次元モデルに拡張できる。

#### 4. 研究成果

既往の粘塑性論を使わずに、前出の図 - 1 に示すように正規圧密線(NCL)が(塑性)ひずみ速度によって上下にシフトすること、および正規圧密土の等方あるいは1次元圧密時の  $e$ - $\ln t$  関係の二次圧密時(クリープ時)の勾配が応力レベルによらず2次圧密係数  $\lambda_\alpha$  で表せるという一般に受け入れられている実験結果だけをベースに、誤差の自動修正機能を有する下負荷面の考え方を使って、時間効果特性をモデル化する方法を定式化した。

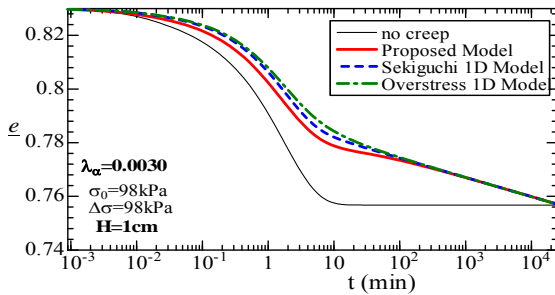


図 - 2 正規圧密土の標準圧密試験のシミュレーション

図 - 2 は提案モデル(実線)、非定常流動曲面モデル(破線)および超過応力型モデル(一点鎖線)の3つのモデルによる正規圧密粘土の標準圧密試験の解析結果(間隙比~時間関係)を示すが、どのモデルでも最終勾配は2次圧密係数  $\lambda_\alpha$  になり、大きな差異はない(ここに、細線"no creep"は時間効果を考慮しない結果)。一方、図 - 3 は3つのモデルによる正規圧密粘土の1次元定ひずみ速度圧縮試験の解析結果(応力~間隙比関係)を示す。载荷過程でひずみ速度を 2.0%/min - 0.002%/min - 2.0%/min と変化させているが、解析結果はモデルにより大きく異なる。非定常流動曲面モデルではひずみ速度を再び速くしても圧密曲線は上方にシフトしない(アイソタックが表現できない)。超過応力型モデルではひずみ速度を変えたとき不連続に応力が変化する。一方、提案モデルではアイソタックを含めてよく知られている1次元圧縮時のひずみ速度効果を適切に表現している。

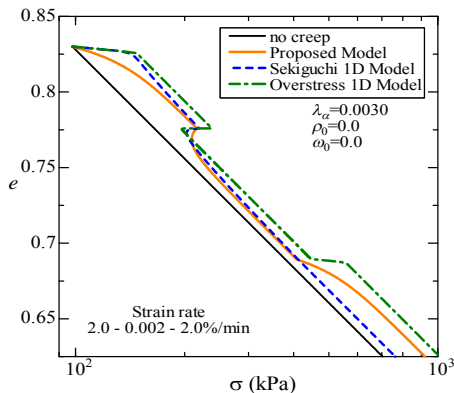


図 - 3 正規圧密土の定ひずみ速度圧縮挙動(途中で速度変化)

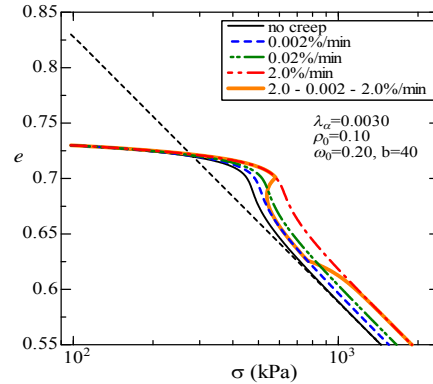


図 - 4 提案モデルによる自然堆積土のシミュレーション(太線は途中で速度を変化)

図 - 4 は提案モデルによる自然堆積土のひずみ速度を変えた1次元圧縮の解析結果であるが、アイソタックを含め自然堆積粘土の実測値と良い対応を示す。なお、非定常流動曲面モデルや超過応力モデルは過圧密土や自然堆積土の時間効果特性は対象外となる。また、すでに提案している  $t_{ij}$  の概念を使えば  $t_{ij}$  空間で流れ則を考えるだけで中間主応力を考慮した3次元時間依存性モデルが出来る。図 - 5 は自然堆積土の非排水せん断試験のシミュレーションを示すが、多次元におけるアイソタックを含め自然堆積土の実験結果の特徴を説明することができた。

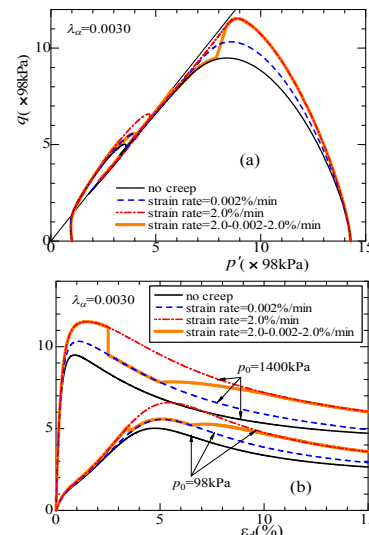


図 - 5 初期応力の異なる自然堆積土の等ひずみ速度非排水せん断試験のシミュレーション(太線は途中で速度を変化)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4件)

森河 由紀弘, 鈴木 僚, 増田 彩希, H. M. Shahin, 中井 照夫 (2017): 端部固定型ジオシンセティックスを用いた支持力の補強効果, 地盤工学ジャーナル,

査読有, 12(2), 277-287.  
<https://doi.org/10.3208/jgs.12.277>  
Shahin H.M., Nakai T., Morikawa Y. and Masuda S. (2017): Effective use of geosynthetics to increase bearing capacity of shallow foundations, Canadian Geotechnical Journal, 査読有, 54(12), 1647-1658.  
<https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0505>  
Shahin H.M., Nakai T., Ishii K. Iwata T and Kuroi S. (2016): Investigation of influence of tunneling on existing building and tunnel - model tests and numerical simulations, Acta Geotechnica, 査読有, 11(3), 679-692.  
<https://doi.org/10.1007/s11440-015-0428-2>  
Farias M.M., Giraldo-Zuluaga R.A. and Nakai T. (2016): A new hardening rule to model the effect of density on Soil behavior, DYNA, 査読有, 83(197), 58-67.  
<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n197.47010>

中部大学・工学部・客員教授  
研究者番号：00110263

〔学会発表〕(計 5件)

Nakai T. and Shahin H.M. (2018): A single hardening elastoplastic model for describing stress dependency of plastic flow, ComGeo2018,  
Shahin H.M., Nakai T., Kato M. and Okuda K. (2017): Support mechanism of anchor type retaining wall in braced excavation and analysis of a field observation, Proc. of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE),  
Nakai T., Shahin H.M. and Kyokawa H. (2016): New description of time-dependent behavior of geomaterials not using ordinary viscoplastic theories, Plasticity 2016, CD  
Kaya L.H., Ooi P.S.K., Nakai T., Adams M.T., Nicks A.J.E. and Shahin H.M. (2016): Numerical load testing of geosynthetic reinforced foil, Proc. of CECAR7, Web  
Nakai T., Shahin H.M. and Kyokawa H. (2016): New approach for 1D and 3D modeling of time-dependent behavior of geomaterials, Proc. of EMI (Engineering Mechanics Institute of the ASCE) Int. Conf.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 照夫 (NAKAI, Teruo)