

自然堆積粘土の内部構造の変化および移動硬化を考慮した弾粘塑性構成モデル

京都大学大学院 学生会員 ○澤田 菜伊  
 京都大学大学院 フェロー会員 岡二 三生  
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合  
 名城大学 正会員 小高 猛司

1 はじめに

自然堆積粘土の挙動を表現するため、弾粘塑性体として定式化およびモデル化を行ってきたが、初期応力状態が異方圧密状態にあり、また繰返し載荷時の挙動を表現することを考慮すると、移動硬化を考慮する必要がある。本報では、初期構造を持つ自然堆積粘土と構造を持たない再構成粘土の挙動の差に着目し、Kimoto<sup>1)</sup>による内部構造の変化を考慮した弾粘塑性構成モデルに非線形移動硬化則<sup>2)</sup>を導入し、非排水単調載荷時の挙動を表現することを目的としている。

2 弾粘塑性構成モデルの定式化

過圧密境界面を式(1)のように与える。 $\eta_{ij}^*$ は偏差応力テンソルと平均有効応力の比で表される応力比テンソル、 $M_m^*$ は変相応力比である。 $f_b < 0$ の時は過圧密領域にあり、 $f_b \geq 0$ の時は正規圧密領域にある。式(3)より粘塑性体積ひずみ $\varepsilon_v^{vp}$ の増減に伴って硬化および軟化を表現している。 $\sigma'_{ma}$ は内部構造変化に伴う劣化を考慮し、式(4)で表す。 $z$ は粘塑性ひずみ速度の第2不変量の累積値であり、全粘塑性ひずみの増加に伴って減少する $\sigma'_{ma}$ により軟化を表現しているが、その低減率は構造パラメータ $\beta$ で表される。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)} + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = c \quad (1) \quad \bar{\eta}_{(0)} = \left\{ (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp \left( \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp} \right) \quad (3) \quad \sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z) \quad (4)$$

移動硬化を考慮した静的降伏関数を式(5)のように与える。 $a^*$ は材料パラメータであり、構造の変化を制御している。 $\tilde{M}$ は正規圧密領域では変相応力比と等しいとする。また $\chi^*$ は移動硬化パラメータ、 $\sigma'_{mar}$ は基準圧(正規圧密粘土の場合は初期の圧密圧力に等しい)である。式(8)より $\sigma'^{(s)}_{my}$ の初期値 $\sigma'^{(s)}_{myi}$ は $\sigma'_{mai}$ の減少に伴い減少する。

$$f_y = \bar{\eta}_\chi + a^* \tilde{M} \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'^{(s)}_{my}} = 0 \quad (5) \quad \bar{\eta}_\chi = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\sigma'^{(s)}_{my} = \frac{\left\{ \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z) \right\} \sigma'_{mai} \sigma'^{(s)}_{myr} \exp \left( \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp} \right)}{\sigma'_{mar}} \quad (7)$$

$$\sigma'^{(s)}_{myi} = \frac{\sigma'_{mai} \sigma'^{(s)}_{myr}}{\sigma'_{mar}} \quad (8)$$

粘塑性ひずみの発生に伴う移動硬化を式(9)で表わす。

$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad (9) \quad f_p = \bar{\eta}_\chi + \tilde{M} \ln \left( \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mp}} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \gamma (\Phi_1 (f_y)) \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (11) \quad \langle \rangle \text{は Macaulay's bracket}$$

$B^*$ は移動硬化パラメータ、 $M_f^*$ は破壊応力比、 $d\gamma^{vp*}$ は粘塑性偏差ひずみ増分 $de_{ij}^{vp}$ の第2不変量である。粘塑性ポテンシャル関数は移動硬化を考慮し、式(10)で与える。ま

た、粘塑性流れ則は超過応力型の粘塑性流れ則を仮定し、式(11)で与える。

3 提案モデルの検証

静的降伏関数(式(5))では、粘塑性ひずみの発生に伴って移動硬化を表している第一項は減少する。一方、内部構造の変化を表す第二項では $\sigma'^{(s)}_{my}$ が減少する。これらの二項のバランスにより移動硬化および内部構造の変化の影響のバランスが変化し、挙動に現れる。いま、このバランスを考え、材料パラメータ $a^*$ を0-1の値で変化させ、不攪乱粘土および再構成粘土の非排水単調載荷試験(有効拘束圧 100kPa, ひずみ速度 0.05%/min)の解析を行う。なお粘塑性パラメータ $C_{01}$ および $C_{02}$ は固定されている。解析に用いたパラメータをTable1に示す。

Table1 Material parameters

パラメータ			
初期間隙比 $e_0$	1.6642	構造パラメータ $\sigma'_{mai}$ (kPa)	80
初期せん断弾性係数 $G_0$ (MPa)	40.37	構造パラメータ $\sigma'_{maf}$ (kPa)	80 40
破壊応力比 $M_f^*$	1.10	移動硬化パラメータ $B^*$	10
変相応力比 $M_m^*$	1.10	粘塑性パラメータ $C_{01}$ (1/s)	$5.0 \times 10^{-9}$
粘塑性パラメータ $m'$	18.33	粘塑性パラメータ $C_{02}$ (1/s)	$5.0 \times 10^{-9}$
圧密指数 $\lambda$	0.46537	材料パラメータ $a^*$	0.0~1.0
膨潤指数 $\kappa$	0.05361	構造パラメータ $\beta$	0 5

構造の変化を考慮しない( $\beta = 0$ )場合に、過圧密境界面の $\sigma'_m$ 軸切片の初期値 $\sigma'_{mai}$ を基準圧 $\sigma'_{mar}$ より小さくする場合について考える。これは、過圧密境界面および静的降伏曲面の縮小を意味している。Fig.1は $\sigma'_{mai} = 80\text{kPa}$ の時の解析結果を示したものである。なお、 $B^* = 10$ に固定されている。このように $\sigma'_{mai}$ を $\sigma'_{mar}$ より小さくした数種類の場合について調べると、有効応力径路では、 $a^*$ が小さいほど平均有効応力の減少量が大きく、変相後の正のダイレイタンシーの発生による平均有効応力の回復が顕著であり、軸差応力-軸ひずみ関係では、 $a^*$ が小さい時はひずみ軟化挙動を示した後、ひずみ硬化挙動を示すが、 $a^*$ が大きい時はひずみ硬化挙動を示し続けている。これは $\sigma'_{mai} = \sigma'_{mar}$ (初期応力は過圧密境界面上にある)の場合と同様の傾向を示している。しかし、 $a^*$ が等しい場合を比較すると、有効応力径路では $\sigma'_{mai}$ が小さいほど平均有効応力が減少し始める時の軸差応力が小さく、より著しく減少することがわかった。また、軸差応力-軸ひずみ関係では $\sigma'_{mai}$ が小さいほど同じ軸ひずみに対する軸差応力が小さく、初期の立ち上がりが緩やかになる傾向にある。以上のことから、有効応力径路、軸差応力-軸ひずみ関係のどちらにおいても、 $\sigma'_{mai}$ を $\sigma'_{mar}$ より小さくすることによって、初期の緩やかな立ち上がりを表現することがわかった。

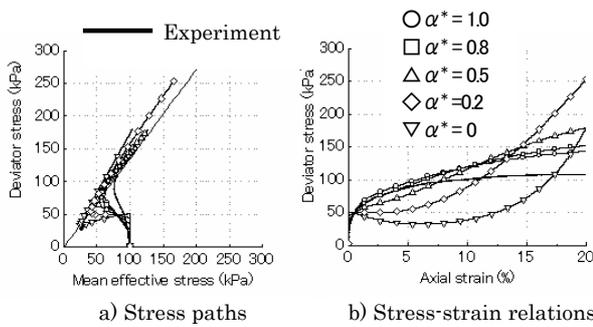


Fig.1 Effects of parameter  $\alpha^*$  not considering structural change ( $\sigma'_{mai}=80\text{kPa}$ ,  $B^*=10$ ,  $\beta=0$ )

次に、構造の変化を考慮する( $\beta > 0$ )場合について考える。Fig.2は $\sigma'_{mai}=80\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{maj}=40\text{kPa}$ ,  $\beta=5$ の時の解析結果を示したものである。なお、 $B^*=10$ に固定されている。 $\beta$ に数種類の値を入れ、構造の変化を考慮する場合について調べると、有効応力径路、軸差応力-軸ひずみ関係ともに $\alpha^*$ の影響については構造の変化を考慮しない( $\beta=0$ )場合と同様の傾向が見られた。しかし、 $\alpha^*$ が等しい場合を比較すると、有効応力径路では $\beta$ が小さいほど平均有効応力の減少量が小さく、変相後の平均有効応力の回復が顕著であることが分かった。また軸差応力-軸ひずみ関係では $\beta$ が小さいほど、ひずみ硬化挙動が著しく、同じ軸ひずみに対する軸差応力が大きくなっている。これは $\beta$ は $\sigma'_{ma}$ の低減率を表すパラメータであり、 $\beta$ が大きいほど早く構造の劣化が進むためである。

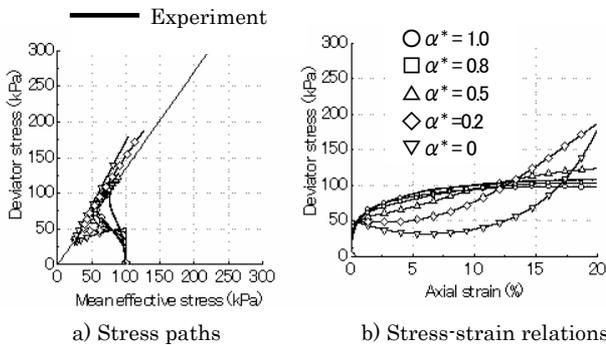


Fig.2 Effects of parameter  $\alpha^*$  considering structural change ( $\sigma'_{mai}=80\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{maj}=40\text{kPa}$ ,  $B^*=10$ ,  $\beta=5$ )

#### 4 非排水単調載荷試験結果の解析

提案モデルを用いて東大阪新庄にて採取した鋭敏な自然堆積粘土および試験後の供試体を練返して成形した再構成粘土を用いた非排水単調載荷試験(有効拘束圧 100kPa, ひずみ速度 0.05%/min)の解析を行う。Table2に解析に用いたパラメータを示す。

Table2 Material parameters for Eastern Osaka clay

パラメータ	不攪乱粘土	再構成粘土
初期間隙比 $e_0$	2.2457	1.6642
初期せん断弾性係数 $G_0$ (MPa)	9.59	40.37
破壊応力比 $M_r^*$	1.23	1.10
変相応力比 $M_m^*$	1.23	1.10
粘塑性パラメータ $m'$	25.17	18.33
圧密指数 $\lambda$	0.46537	0.46537
膨潤指数 $k$	0.05361	0.05361
構造パラメータ $\sigma'_{mai}$ (kPa)	100	90
構造パラメータ $\sigma'_{maj}$ (kPa)	50	45
移動硬化パラメータ $B^*$	0.0	10
粘塑性パラメータ $C_{01}, C_{02}$ (1/s)	$5.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^{-9}$
材料パラメータ $\alpha^*$	1.0	1.0
構造パラメータ $\beta$	5	5

まず不攪乱粘土の場合の解析結果を Fig.3 に示す。移動硬化は考慮せず( $B^*=0$ ),  $\alpha^*=1$  と設定した。解析結果は実験結果に比べ、有効応力径路および軸差応力-軸ひずみ関係で、初期の立ち上がりが急であるが、ひずみ軟化挙動をよく再現できている。

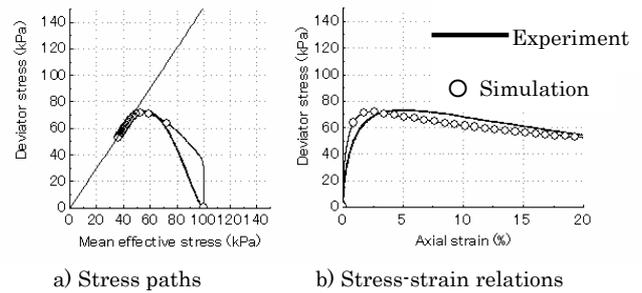


Fig.3 Experimental and simulation results of Eastern Osaka clay (Undisturbed clay)

次に、再構成粘土の場合であるが、不攪乱粘土の場合と異なり、有効応力径路で正のダイレイタンスの発生により変相する挙動が見られ、移動硬化を考慮する必要がある。 $\sigma'_{mai}=90\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{maj}=45\text{kPa}$ ,  $B^*=10$ ,  $\beta=5$ ,  $\alpha^*=1$  と設定した時の解析結果を Fig.4 に示す。有効応力径路では、解析結果は実験結果よりも平均有効応力の減少量が大きいですが、変相した後、破壊線に接する様子を再現できている。また、軸差応力-軸ひずみ関係ではひずみ硬化挙動をよく表現できている。

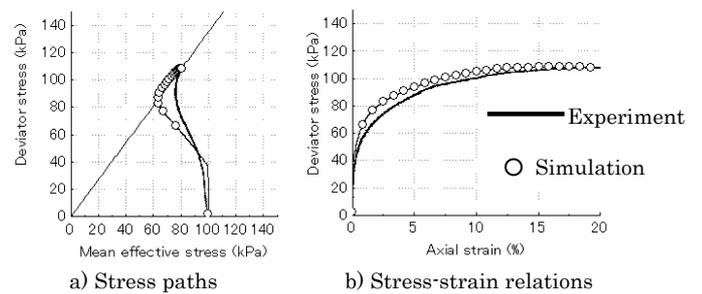


Fig.4 Experimental and simulation results of Eastern Osaka clay (Reconstituted clay)

#### 5 結論

移動硬化を考慮することで、非排水単調載荷時の有効応力径路で正のダイレイタンスの発生により変相する挙動を再現できた。また過圧密境界面の $\sigma'_m$ 軸切片の初期値 $\sigma'_{mai}$ を基準圧 $\sigma'_{mar}$ より小さくすることで、有効応力径路および軸差応力-軸ひずみ関係の初期の緩やかな立ち上がりを表現できた。さらに構造の変化を考慮することでより実験結果の再現性が高まることが分かった。材料パラメータ $\alpha^*$ については、不攪乱粘土、再構成粘土のどちらの場合も $\alpha^*=1$ とした時が最も実験結果をよく再現しており、非排水単調載荷試験の解析によると、 $\alpha^*=1$ とするのが適当であると考えられる。

参考文献 1)S. Kimoto, Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy, Dr.Thesis. Kyoto University, 2002. 2)F.Oka, Acyclic elasto-viscoplastic constitutive model for based on the nonlinear hardening rule, Proc.4<sup>th</sup> Int.Symp.Numerical Models in Geomechanics, Swansea, Pande, G.N. and Pietruszczak,S. eds., 1, Balkema, pp.105-114,1992.