

粘土の非排水せん断挙動に及ぼす異方性の影響に関する弾塑性力学的一考察

名古屋大学（正）浅岡顕，野田利弘，金田一広（学）山田正太郎

1. はじめに

著者らは、自然堆積粘土の変形挙動を記述するために、その特徴である構造・過圧密・異方性とそれらの塑性変形に伴う発展を考慮して、回転硬化概念を有する上・下負荷面修正カムクレイモデル¹⁾を提案している。本報告では、自然堆積粘土の初期および誘導異方性に着目しながら、このモデルの応答として、三軸圧縮と伸張のせん断条件、および切出し角度の違いによる非排水せん断挙動の違いを示す。

2. 回転硬化概念を有する上・下負荷面修正カムクレイモデルの概要

本モデルの詳細は文献1)に譲り、概要を述べる。応力誘導異方性を表現するため、関口・太田²⁾による応力パラメータ α とその発展を記述する回転硬化概念 (Hashiguchi and Chen³⁾)を修正カムクレイに適用して、構造を失った異方正規圧密土の挙動を表す。構造を有する過圧密土は、この回転硬化修正カムクレイを土台にして、構造の程度を表すためにカムクレイポテンシャルの外側に相似な上負荷面⁴⁾（相似中心は原点 $p'=q=0$ でその相似率を R^* ($0 < R^* \leq 1$)）を、過圧密状態には Hashiguchi⁵⁾に倣い、上負荷面の下側に相似な下負荷面（相似中心は原点 $p'=q=0$ でその相似率を R ($0 < R \leq 1$)，逆数は過圧密比に相当）を導入する。塑性変形の進展に伴い、構造 (R^*)は劣化 ($R^* \rightarrow 1$)、過圧密 (R)は解消 ($R \rightarrow 1$)し、異方性(すなわち、回転硬化変数テンソル β ³⁾)も発達・消滅する。本報告では、異方性に着目して、このモデルが示す非排水（等体積）せん断応答について調べた。材料定数および初期値は、自然堆積粘土を想定しながら、特に正規圧密土化指数 m と構造劣化指数 a, b, c の値は、粘土の典型的な変形挙動を考慮して、過圧密解消が構造の喪失に比べて早く生じる⁶⁾よう決めている(表1)。また、異方性の発達・消滅については、粘土は砂に比べて遅いと考えられるが、ここでは極めて遅い場合($br=0.000083$)を想定した。4.においては速い場合($br=83.3$)との比較の結果も示す。

3. 三軸圧縮・伸張非排水せん断挙動

三軸「圧縮」および「伸張」せん断時の構成式応答を図2, 3に示す。図2の構造を有する正規圧密土 ($1/R=1.0$)では、構造を有する土に良く見られる低応力比における軟化挙動を示している。図3の構造を有する過圧密土 ($1/R=10.0$)では、過圧密の解消が構造の劣化に比べ速く生じるために、自然堆積粘土の三軸試験でよく見られるような「巻き返し」が見られる。また、両者とも伸張よりも圧縮せん断の方が、非排水せん断強度が大きいことが実験でよく確認されるが、構成式の応答もその傾向を表している。 $p'-q$ 平面(図2,3上中図)上に示した初期の下負荷面およびその回転軸

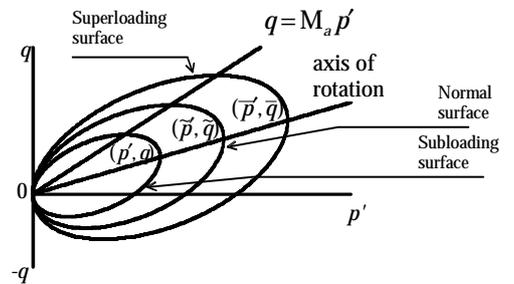


図1：回転硬化修正カムクレイポテンシャル

表1 材料定数および初期値

弾塑性パラメータ	
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.131
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.040
限界状態定数	1.13
$p'=98.1\text{kPa}$ における N.C.L.上の比体積	1.974
ポアソン比	0.4
発展則パラメータ	
構造劣化指数 $\begin{cases} a \\ b \\ c \end{cases}$	$\begin{cases} 0.31 \\ 1.0 \\ 1.0 \end{cases}$
正規圧密土化指数 m	0.89
回転硬化指数 br	0.000083, 83.3
回転硬化限界定数 mb	1.0
初期値	
初期鉛直有効応力 σ'_{v0} (kPa)	98.1
初期側圧係数 K_i	1.0
初期構造 $1/R^*_0$	5.0
初期過圧密 $1/R_0$	1.0, 10.0
初期異方性 $\sigma'_{\theta} = (3/2) \sigma'_{\theta^*} \rho^{1/2}$	0.375

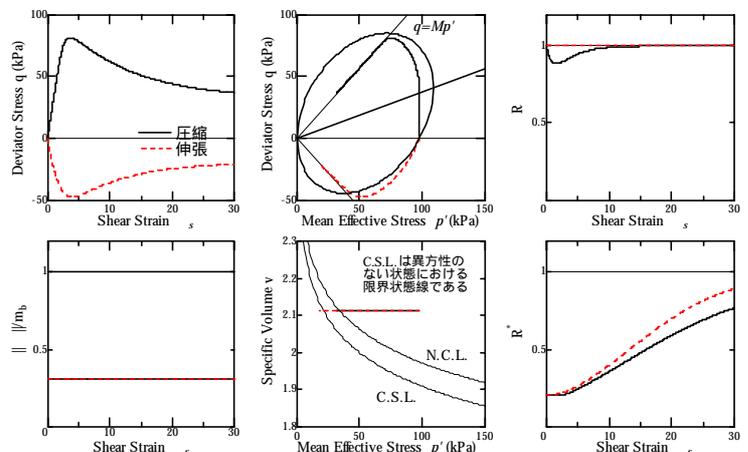


図2：非排水三軸圧縮・伸張せん断（正規圧密土）

構造、過圧密、異方性、三軸圧縮・伸張、切出し角度

〒464-8603 名古屋市千種区不老町名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻, Tel:052(789)4624, Fax:052(789)4624

は、初期異方性を考慮したことにより、圧縮側に傾いているが、異方性の発展速度が非常に遅い場合は、せん断過程においても回転軸はほとんど動かないためこのような差が生じる。

4. 切出し角度による影響

構造を有する正規圧密土 ($1/R=1.0$) に対し、切出し角度（堆積面に直行する方向と圧縮方向との角度（図4））を変化させた場合の、非排水せん断時の応答を示す。ここでは、（単位の塑性変形に対し）異方性の発達・消滅速度が非常に遅い場合と、速い場合を考えた。異方性の発展が非常に遅い場合（図5）は、切出し角度が大きいほど非排水せん断強度が小さいことがわかる。異方性の発達の程度を示す $\|\beta\|/m_b$ は、ほとんど変化していない一方で、異方性の発展が非常に速い場合（図6）は、切出し角度の変化をほとんど受けていない。これらのことより、切出し角度に応じてせん断挙動が変化する要因として初期異方性の影響が考えられる。また、せん断が進めば最終的に異方性が限界まで発達（ $\|\beta\|/m_b=1$ ）しているが、切出し角度が大きい場合は、異方性は一旦消滅方向に向かった後、再び発達している。異方性は応力に誘導され変化し、その変化の過程において初期に有していた異方性の影響が次第に薄れていく。

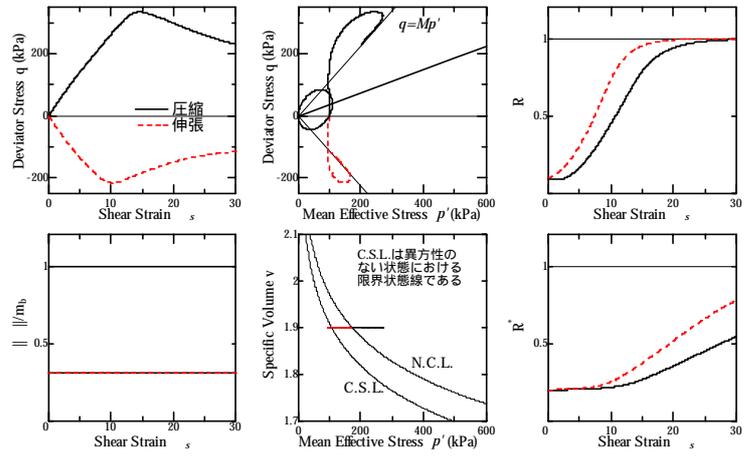


図3：非排水三軸圧縮・伸張せん断（過圧密土）

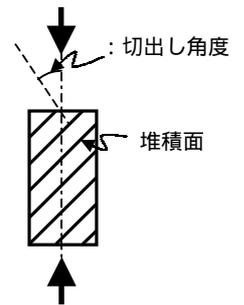


図4：切出し角度

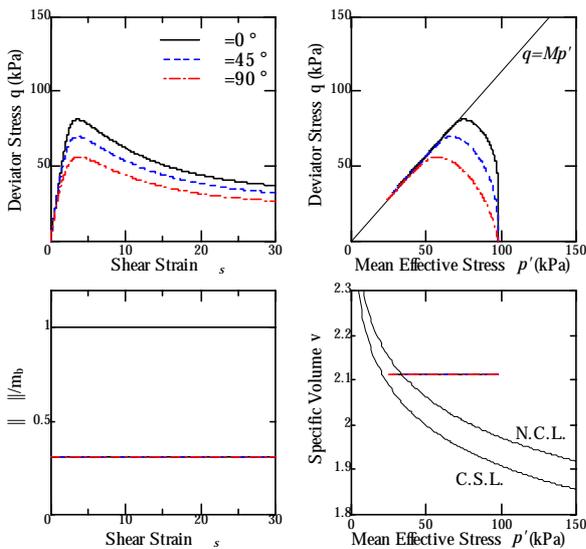


図5：切出し角度の影響

（異方性の発展速度が遅い場合）

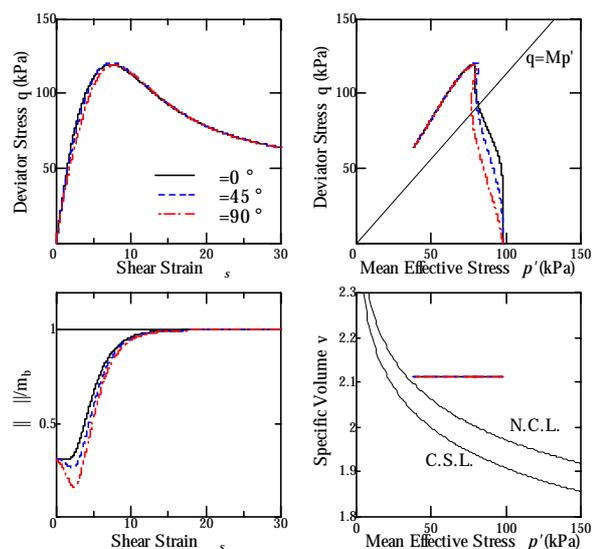


図6：切出し角度の影響

（異方性の発展速度が速い場合）

5. おわりに

本報告では、異方性の発展が非常に速い場合は、室内せん断試験などで初期異方性の影響が現れにくいという、計算例を示した。このことは、自然堆積粘土のせん断試験で初期異方性の影響が実際に観察されるから、粘土の異方性は比較的発展しにくいことを示唆している。一方で自然堆積粘土の異方性が発達しているのは、地盤の生成過程において、コロイドから固体へと相変化するほどの極めて大きな塑性履歴を受けたためであると考えられる。

6. 参考文献

1)Asaoka, A. et al(2002): " An elasto-plastic description of two ... ", *S&F*, 投稿中. 2) Sekiguchi, H. & Ohta, H. (1977): " Induced anisotropy and time dependency in clays", *Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session.* 3) Hashiguchi, K. & Chen, Z.-P. (1998): " Elastoplastic constitutive equations of soils ...", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 22, 197-227. 4) Asaoka, A. et al. (2000): " Superloading yield surface...", *S&F*, 40(2), 99-110. 5) Hashiguchi, K.(1989): " Subloading surface model ...", *Int. J. Solids and Structures*,25, 917-945. 6) Asaoka et al.(2001): " The decay of structure ...", *Proceedings of The Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.1, 19-22.