

平面ひずみ非排水圧縮せん断中に形成される せん断帯の傾きと非共軸パラメータの関係

志比 利秀*・亀井 健史*・永吉 雄大**・武田 幸子***

*島根大学総合理工学部地球資源環境学科

**島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学専攻

***島根大学総合理工学部研究生

Relationship between Inclination Angle of Shear Bands during Undrained Shear under Plane Strain Loading Conditions and Non-coaxial Parameter

Toshihide SHIBI*, Takeshi KAMEI*, Takehiro NAGAYOSHI** and Sachiko TAKEDA***

*Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

**Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Graduate School of Shimane University

***Research student, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

Abstract

Recently, various analyses applying to a non-coaxial Cam-clay model, that is, the theory of shear bands formation based on finite strains/deformations, the estimation of slip surfaces based on bifurcation analysis, and the simulation of deformation behavior of clay using finite element analysis were carried out well. However, many uncertainties surround the influence of non-coaxial parameters on failure mechanism of the clay using non-coaxial Cam-clay model.

This paper shows that the influence of the non-coaxial parameter on the axial strain at forming shear bands and the inclination angle of formed shear bands is investigated by simulation of undrained shear under plane strain loading conditions using finite element analysis.

1. はじめに

材料の変形挙動を表現するために構成方程式が用いられている。しかしながら、材料の変形挙動の全てを表現できる構成方程式には、非常に多くの定数が必要になる場合が多い。構成方程式に用いる定数が多くなると、構成方程式は煩雑となり、定数間のバランスも重要となるので、より少ない定数から材料の変形挙動を表現できる方が良い場合が多い。したがって、材料の着目した変形挙動を簡便に表現する場合には、その変形挙動を表現するに十分な構成方程式を選択することが重要となる。

粘土の構成方程式の一つに Cam-clay モデル¹⁾がある。このモデルは土の構成モデルの中で最も基本的なモデルの一つであり、必要となる土質定数は4つと少ないにも関わらず、

粘土の圧密・せん断挙動を統一的に表現できるモデルである。しかしながら、このモデルは粘土の一軸圧縮試験等でしばしば観察されるひずみの局所化からせん断帯の発生という現象の表現にはあまり適していない。このような場合には、他の構成方程式を用いた方が良いと考えられる。

ところで、最近、このようなひずみの局所化やせん断帯の発生という現象に着目した報告が多くなされている。実験的なアプローチに着目すると、Saada *et. al.*^{2),3)}は、粘性土や砂質土に対して中空円筒ねじり試験を行うことにより、せん断帯が形成されるときに応力状態やそのせん断帯の傾きに関して詳細に報告している。粘土供試体の変形挙動に理論的な分岐解析を用いた場合には、供試体の均一変形限界点（分岐点）および供試体破壊時のすべり面の発生位置および形状が良く説明できることが報告されている^{4)~8)}。また、有限要素解析を用いた報告には、Asaoka *et. al.*⁹⁾や小林ほか¹⁰⁾が解析したものがあり、供試体の形状に微小な初期不整を導入することにより、載荷に伴い供試体に発生するせん断帯のシミュレーションを行っている。また、志比ほか¹¹⁾は、せん断帯の形成過程や粘土のせん断強さに影響を及ぼしにくい初期不整の位置を検討しており、供試体の対角の2隅に初期不整を導入するのがよいことを報告している。

このようなひずみの局所化からせん断帯の発生という現象を表現する場合には、Cam-clay モデルに非共軸項を導入した非共軸 Cam-clay モデル¹²⁾がしばしば用いられている。このモデルは、Cam-clay モデルに用いられる4つの土質定数に加えて、非共軸パラメータ A を用いており、ひずみの局所化からせん断帯の生成に至る粘土の変形挙動を表現することができる。このモデルを用いた解析例には、有限変形弾塑性理論に基づいたせん断帯の生成理論¹²⁾や分岐解析に基づいたすべり面の発生位置・形態の予測^{4)~7)}、有限要素解析によるすべり面の形成過程のシミュレーション¹¹⁾などがある。

上記の解析で用いる非共軸パラメータの値に関する妥当性を検討した報告には以下が挙げられる。例えば、Yatomi *et. al.*¹²⁾は、有限変形弾塑性理論に基づいたせん断帯の生成理論を展開し、非共軸パラメータが大きくなると最大主応力方向から測ったせん断帯の傾きの角度が大きくなることを示し、非共軸パラメータの値は0.01が適当であることを報告している。また、志比ほか⁸⁾は、0~0.02の範囲の非共軸パラメータを用いて分岐解析を行っており、分岐解析結果に影響を及ぼす非共軸パラメータの範囲が0.001以上であることを報告している。しかしながら、非共軸パラメータの値の妥当性には未だ不明な点が多い。

本研究では、非共軸パラメータの違いが供試体に形成されるせん断帯の傾きに及ぼす影響を検討するため、土の構成方程式に共軸 Cam-clay モデルおよび0.02以下の範囲の5種類の非共軸パラメータを仮定した非共軸 Cam-clay モデルを用いる。これらの構成方程式を用いた有限要素解析により、正規圧密粘土供試体の平面ひずみ非排水圧縮せん断試験をシミュレートした。なお、本解析では、計算機の容量や時間的な制約を回避するため、供試体の右上隅と左下隅に初期不整を導入する擬似分岐解析手法を用いている。その結果、供試体の変形挙動およびそのとき供試体内に発生する最大せん断ひずみの分布の遷移を図示し、非共軸パラメータの違いが、せん断帯が形成されるときに軸ひずみ量や形成されるせん断帯の傾きに及ぼす影響を解析的に明らかにしている。

2. 有限変形非共軸 Cam-clay モデル¹²⁾

有限変形非共軸 Cam-clay モデルの構成方程式の定式化には、通常の Cam-clay モデルで用いられる自然対数表示による圧縮指数 λ 、自然対数表示による膨張指数 κ 、限界状態係数 M 、間隙比 e の 4 つに非共軸パラメータ A を加えた 5 つの土質定数が必要とされる。このモデルは、通常の Cam-clay モデルと同様に粘土の圧密・せん断挙動を統一的に表現できるのに加え、粘土の破壊の際に発生するひずみの局所化やせん断帯の発生などの現象も表現できる。ここでは、その構成方程式を簡単に説明する。

まず、全 Cauchy 応力 \mathbf{T} 、有効 Cauchy 応力 \mathbf{T}' と間隙水圧 u の間に次式で与えられる有効応力の原理を仮定する。

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}' - u\mathbf{I}$$

このとき、Cam-clay モデルに用いられるパラメータ、平均有効応力 p' と一般化された偏差応力 q は、それぞれ次式で定義される。

$$p' = -\frac{1}{3} \text{tr } \mathbf{T}', \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}}$$

ここで、 \mathbf{S} は有効 Cauchy 応力 \mathbf{T}' の偏差成分である。

このとき、有限変形 Cam-clay モデルの降伏関数は次式で与えられる。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta - v^p$$

ここで、 $\eta = q/p'$ であり、 p'_0 は先行圧密応力を、 v^p は塑性体積ひずみを表す。また、 e は間隙比を表し、 λ と κ はそれぞれ自然対数表示による圧縮指数および膨潤指数である。また、 $D = (\lambda - \kappa) / \{M(1 + e)\}^{13}$ はダイレイタンス係数と呼ばれ、 M は限界状態における応力比を表す。

このとき、有限変形共軸 Cam-clay モデルの構成式は次式で与えられる。

$$\hat{T}'_{ij} = \left\{ \left(\bar{K} - \frac{2}{3} \bar{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \bar{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{\bar{G} + \bar{K} \bar{\beta}^2 + h} \left(\frac{\bar{G}}{\bar{\tau}} S_{ij} - \bar{K} \bar{\beta} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\bar{G}}{\bar{\tau}} S_{kl} - \bar{K} \bar{\beta} \delta_{kl} \right) \right\} D_{kl}$$

ここで、 $\hat{T}'_{ij} = \dot{T}'_{ij} - W_{ik} T'_{kj} + T'_{ik} W_{kj}$ は有効 Cauchy 応力の共回転速度であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを表す。また、 $\bar{\beta} = (M - \eta) / \sqrt{3}$ 、 $\bar{\tau} = \sqrt{\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} / 2}$ である。さらに、 $\bar{G} = [\{3(1 - 2\nu)(1 + e)\} / \{2(1 + \nu)\kappa\}] p'$ はせん断弾性係数を、 $\bar{K} = [(1 + e) / \kappa] p'$ は体積弾性係数を表しており、 $h = (\bar{\beta} / \sqrt{3} D) p'$ は硬化係数である。

本研究で用いる有限変形非共軸 Cam-clay モデルの構成式は、有限変形共軸 Cam-clay モデルの構成式において、物質パラメータを以下のように置き換えることにより与えられる。

$$\bar{G} \rightarrow \frac{h_1 \bar{G}}{h_1 + \bar{G}}, \bar{K} \rightarrow \frac{(h_1 - h) \bar{K}}{h_1 - h - \bar{\beta}^2 \bar{K}}, \bar{\beta} \rightarrow \frac{h_1 \bar{\beta}}{h_1 - h}, h \rightarrow \frac{h_1 h}{h_1 - h}$$

ただし、 h_1 は第2硬化係数と呼ばれ、硬化係数と同様の形で次式のように仮定される。

$$h_1 = \frac{\bar{\beta}}{\sqrt{3}A} p' (> 0)$$

ここで、 A は非共軸パラメータと呼ばれ、 $A=0$ のとき共軸モデルを表わし、 $A>0$ のとき非共軸モデルを表す。

現在まで、非共軸性を詳細に検討した実験例はほとんど見られない。しかし、中空ねじり試験に基づいた非共軸性の存在の指摘、あるいはその必要性を示した研究が、最近行われている。なお、本研究でも上記の h_1 は、Yatomi *et. al.*¹²⁾による表現を適用する。

3. 解析条件

本研究では、非共軸パラメータの違いが平面ひずみ非排水圧縮せん断試験中に供試体内に形成されるせん断帯の傾きに及ぼす影響を明らかにするために、有限変形弾塑性理論に基づいた土/水連成有限要素解析手法^{9)~11),14)}を用いて平面ひずみ非排水圧縮せん断試験のシミュレートを行った。供試体の寸法は、縦8 cm、横4 cmとした(図-1)。その供試体は、4節点アイソパラメトリック要素を用いて要素分割されており、全要素数は32個、全節点数は45個とした。供試体の土質定数、境界条件等が一樣な場合には、供試体の上端部に強制変位を作用させると通常は、供試体の変形挙動は縦方向には圧縮され横方向には膨らむだけの一様な変形挙動を示す。したがって、通常、せん断帯が形成されるような非一様な変形挙動をシミュレートする場合には、全体剛性マトリックスの固有値解析が必要となる。しかしながら、本研究では、全体剛性マトリックスの固有値解析を回避するために、あらかじめ供試体に不整形(以下、初期不整形と呼ぶ)を与えて供試体の変形挙動を分岐経路へと導く擬似分岐解析を行うものとする。実際の供試体には、初期形態に何らかの不整形を有しているものが多いため、実際の圧縮せん断試験の供試体の初期条件に近いものとなる。図-2に、本研究で用いた初期不整形の位置および形状を示す。初期不整形は、供試体下端面部左側(A点)と上端部右側(E点)に導入する。供試体の上下端面は、実際の供試体整形時に不整形が生じやすい位置であるとともに、供試体の強度に影響を及ぼしにくい位置である。また、初期不整形の大きさ、形状は、粘土供試体のせん断強さに影響を与えない程度の微小な切り欠きとして、点Aと点Eの2点において 10^{-6} mm内側にくぼませることとした。なお、今回導入した初期不整形の位置及び形状は、せん断帯の形成に及ぼす影響が小さな位置であることがすでに報告されている¹¹⁾。

境界条件は、平面ひずみ圧縮せん断をシミュレートするために、供試体の下端面において鉛直方向固定とし、上端面には既知速度を与えて変位制御を行った。ただし、下端面中央部は、剛体移動を抑制するため完全固定とした。実際の一軸圧縮試験などでは、上下端面に働

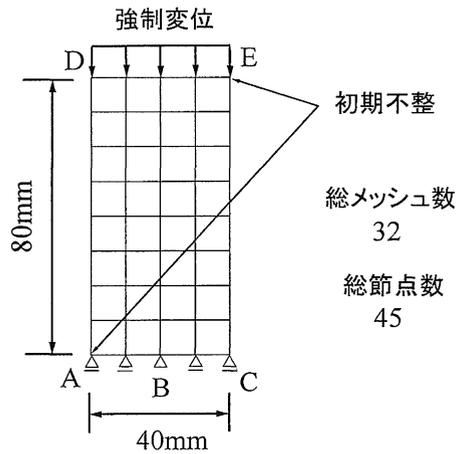


図-1 本解析に用いた有限要素分割と境界条件

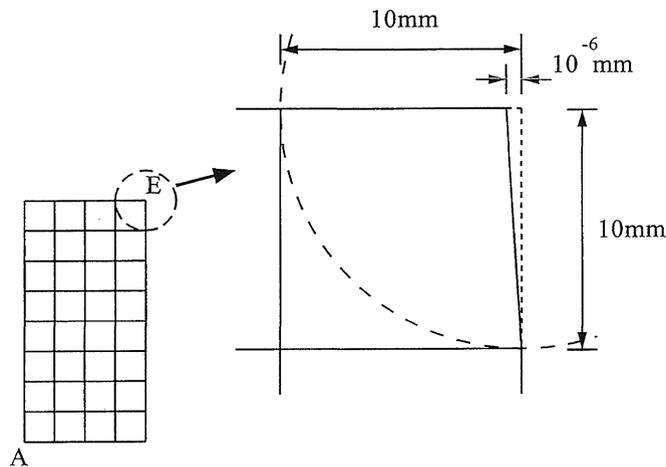


図-2 初期不整の位置および形状

く摩擦の影響を軽減するために、端面にグリース等を塗布する機会が多いことから、上下端面には摩擦は働かないものと仮定する。また、側面は大気圧で与えるものとする。一方、間隙水に関しては、非排水条件を考える。

表-1 に、本研究に用いた梅田層粘土の土質定数を示す¹⁵⁾。

材料の非共軸性を表す非共軸パラメータ A の値は、せん断帯の生成理論や分岐解析によって、その取りうる値は少しずつ明らかとなってきた。せん断帯の生成理論では、非共軸パラメータ A の値が取りうる範囲は $0 \leq A \leq 0.02$ 程度あることが報告されている¹²⁾。また、分

表-1 本解析に用いた土質定数¹⁵⁾

$\lambda=0.231$
$\kappa=0.042$
$\nu=0.333$
$e=1.5$
$M=1.43$

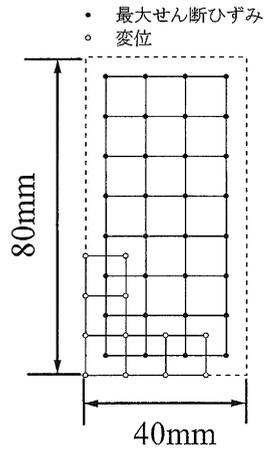


図-3 描画に用いた各要素の代表点

岐解析の結果に影響を及ぼす A の範囲は $0.001 < A \leq 0.02$ 程度であることが示唆されている⁸⁾。なお、既往の研究においては、 $A=0.01$ と仮定した研究が多く、正規圧密粘性土は限界状態に至る前に、強度を発現しやすい一様な変形挙動から強度低下を招く非一様な変形挙動へと移行することが明らかとなっており、非共軸モデルの場合には、非一様な変形挙動へ移行する分岐荷重が共軸モデルに比べて低下することが報告されている^{4)~7)}。しかしながら、現在までのところ、非共軸パラメータ A の値に関する定量的な実験は、ほとんど行われておらず、その正確な値は得られていない。本研究では、非共軸パラメータ A が供試体に形成されるせん断帯の傾きに及ぼす影響を明らかにするために、 A の値を $0 \leq A \leq 0.02$ の範囲で5通りに変化させることとする。

なお、最大せん断ひずみ γ_{\max} の分布を描画する際、 γ_{\max} の値は要素内の1点に代表させることとする (図-3)。

4. 結果および考察

本研究では、非共軸パラメータの違いが供試体に形成されるせん断帯の傾きに及ぼす影響を検討するため、土の構成方程式に共軸 Cam-clay モデルおよび0.02以下の範囲の5種類の非共軸パラメータを仮定した非共軸 Cam-clay モデルを用いて有限要素解析を行うことにより、正規圧密粘土供試体の平面ひずみ非排水圧縮せん断試験をシミュレーションした。以下、代表的な非共軸パラメータを有するものに関して説明する。

図-4~図-6は、それぞれ共軸モデル ($A=0$) と非共軸モデル ($A=0.01, 0.02$) を用いた場合の荷重に伴う供試体の変形過程を示している。

非共軸パラメータの値の違いに関わらず、荷重の進行に伴い、供試体は上下方向に圧縮され、供試体の上部が若干左方向へ移動している様子が認められる (図-4~図-6)。しかしな

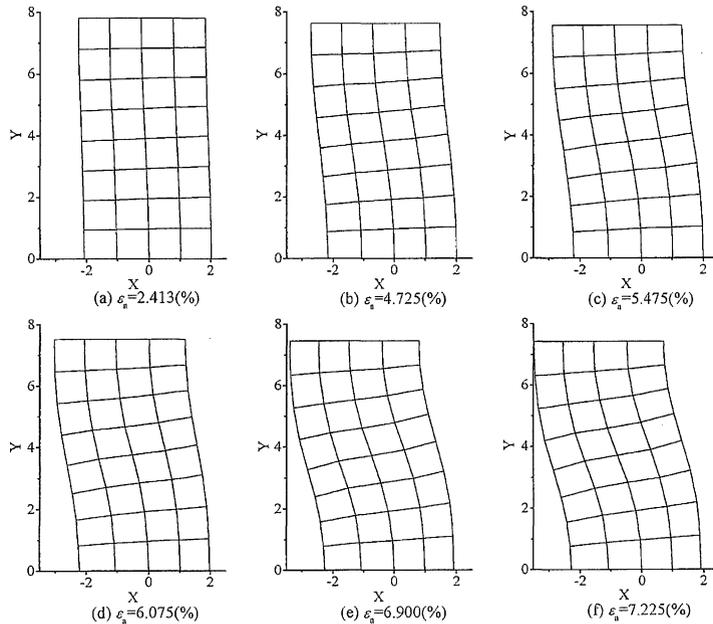


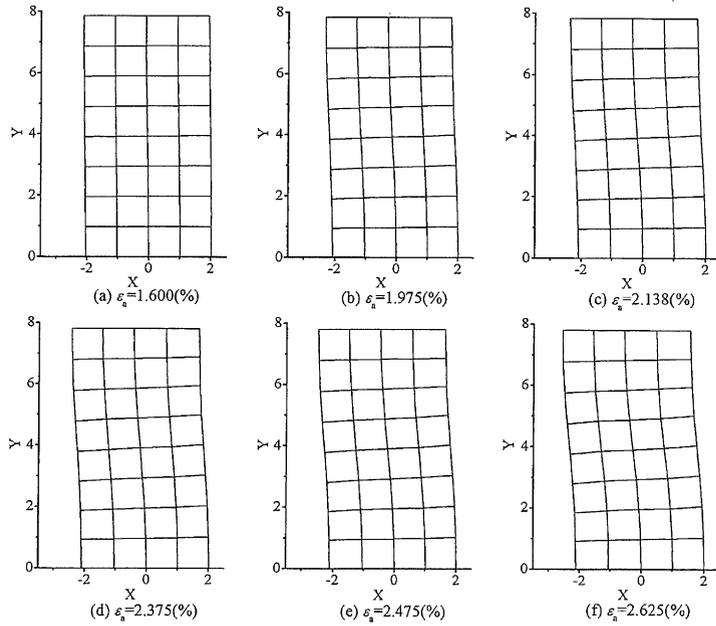
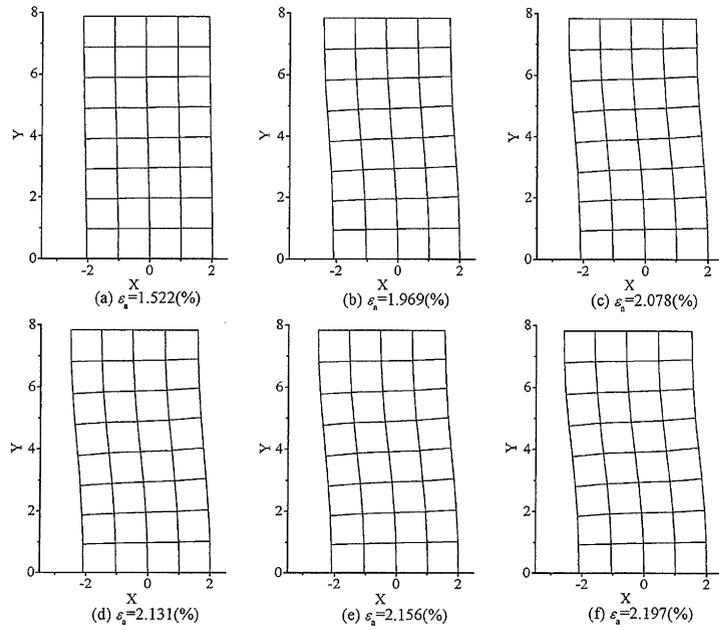
図-4 供試体の変形過程 (共軸 Cam-clay モデル)

がら、図-4(a)、図-5(d)と図-6(f)を比較すると、軸ひずみ量は共軸モデルが一番大きな値となっているのに対し、供試体上端面の左方向への移動量は $A = 0.02$ の非共軸モデルの方が若干大きくなっている。したがって、非共軸パラメータが大きい非共軸モデルの方が非共軸パラメータの小さな非共軸モデルや共軸モデルに比較して、せん断変形の影響を大きく受けていることが予測される。

次に最大せん断ひずみ γ_{\max} の分布の遷移過程を図-7～図-9 に示す。

図-7～図-9 より、荷重に伴う最大せん断ひずみ γ_{\max} の分布の遷移過程は、非共軸パラメータ A の値の違いに応じてせん断帯が形成され始める軸ひずみ量や形成されるせん断帯の傾きの角度などに関しては違いが認められるが、 A の値の違いに関わらず、同様の遷移過程をたどることがわかる。したがって、遷移過程の特徴に関しては、図-7 を用いて説明する。

図-7 は、 $A = 0$ の場合、すなわち共軸モデルの場合の最大せん断ひずみ γ_{\max} の分布の遷移過程を示している。最初、軸ひずみ量が小さな範囲においては、 γ_{\max} は初期不整を導入した供試体右上隅と左下隅近傍で大きな値となっている (図の(a)～(b))。一方、供試体左上隅と右下隅近傍の γ_{\max} は小さな値となっており、供試体中央部の γ_{\max} は両者の平均的な値となっている。供試体右上隅と左下隅近傍および供試体中央部の γ_{\max} の値は、荷重の進行に伴い増加しているが、 γ_{\max} が小さな値となる供試体左上隅および右下隅近傍の γ_{\max} の値

図-5 供試体の変形過程 (非共軸 Cam-clay モデル, $A = 0.01$)図-6 供試体の変形過程 (非共軸 Cam-clay モデル, $A = 0.02$)

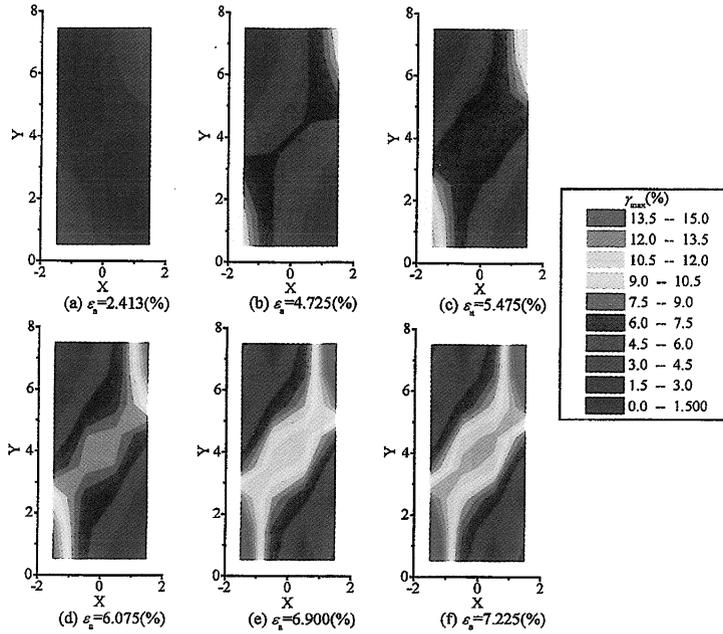


図-7 最大せん断ひずみの分布の遷移過程 (共軸 Cam-clay モデル)

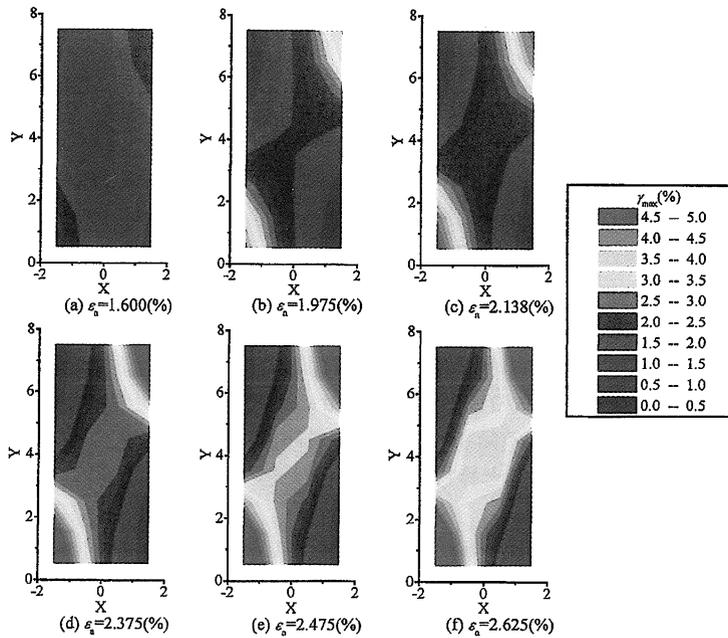


図-8 最大せん断ひずみの分布の遷移過程 (非共軸 Cam-clay モデル, $A=0.01$)

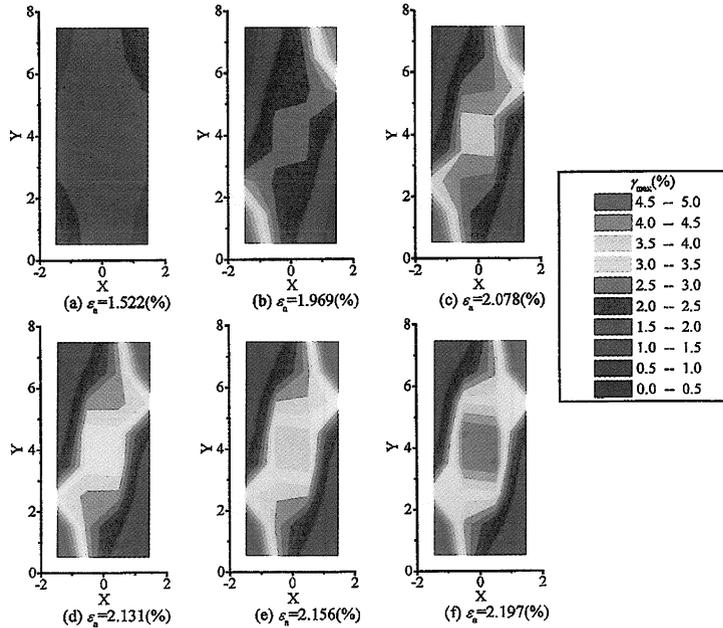


図-9 最大せん断ひずみの分布の遷移過程 (非共軸 Cam-clay モデル, $A=0.02$)

はほとんど変化していない。したがって、载荷に伴い供試体内部にひずみの局所化が発生している様子が認められる。

図の(b)~(c)では、载荷の進行に伴い、 γ_{max} が大きな値を示す領域が供試体右上隅と左上隅から、それぞれ供試体右側面 $Y=5\sim 7.5$ および左側面 $Y=0.5\sim 3$ 程度まで拡大していくとともに、その値を増加してゆく様子が示されている。また、供試体内部においても、供試体右上から左下にかけて γ_{max} が比較的大きな値を示す領域が拡大してゆくのがわかる。一方、左上隅と右下隅近傍の γ_{max} の値には、大きな変化は認められない。

それ以降は、図の(c)~(f)が示すように、载荷の進行に伴う γ_{max} が大きな値を示す領域の遷移傾向は、領域は拡大せず、その値のみが増加する傾向へと変化する。一方、供試体の中央部の γ_{max} は、軸ひずみ量が6.075%程度(図(d))に達すると、右側面 $Y=5$ と左側面 $Y=3$ 近傍を結ぶようなバンド状の領域(以下、せん断帯と呼ぶこととする)に収斂してゆく。水平面から測ったせん断帯の傾きの角度は、最終的に、 45° 程度となる。さらに载荷を続ければ、この領域はすべり面へと移行し、供試体はそのすべり面に沿って破壊することが推察される。

一方、せん断帯が形成され始める軸ひずみ量には違いが認められる。図-10に非共軸パラメータ A の値とせん断帯が形成され始めるときの軸ひずみ量との関係を示す。共軸モデル($A=0$)の場合には、せん断帯が形成されるとききの軸ひずみ量は、6%程度であるのに対して、非共軸モデルの場合には、 A の値が0.0025から0.02へと大きくなるのに伴い、せん断帯

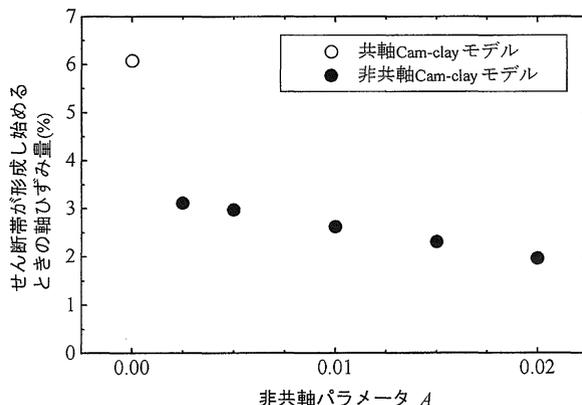


図-10 非共軸パラメータ A の値とせん断帯が形成され始めるときの軸ひずみ量の関係

表-2 非共軸パラメータと形成されるせん断帯の傾き

非共軸パラメータ (A)	共軸 Cam-clay モデル	非共軸 Cam-clay モデル				
	0	0.0025	0.005	0.01	0.015	0.02
せん断帯の傾き	45°	45°	45°	52°	54°	55°

が形成されるとき軸ひずみ量が3%程度から2%程度へと直線的に減少する。したがって、非共軸モデルの方が、共軸モデルの場合に比較して、せん断帯が形成される軸ひずみ量がより小さな値となることがわかる。また、非共軸モデルの場合には、非共軸パラメータが大きいほど、せん断帯が早く形成されることを示唆している。

分岐解析の結果、非共軸パラメータ A の値が大きくなると、供試体の変形挙動が均一変形挙動から非均一変形挙動へと移行する分岐荷重の値が小さくなることが報告されている⁸⁾。本解析の結果からも、非共軸パラメータ A の値が大きくなるとせん断帯が形成される軸ひずみ量が小さくなるのが解析的に明らかとなった。したがって、非共軸パラメータ A を把握することは、供試体の破壊現象の発生を早期に発見する上で重要なことであると考えられる。

次に、形成されるせん断帯の傾きの角度（水平面から測った角度）に着目する。表-2に解析の結果得られた非共軸パラメータの値と形成されるせん断帯の傾きの角度の一覧を示す。共軸モデルの場合には、せん断帯の傾きの角度は45°程度である。一方、非共軸モデルの場合には、A=0.005程度までは共軸モデルの場合との間に違いが認められず、せん断帯の傾きの角度は45°程度である。しかしながら、A=0.005を超えるような場合には、Aの値が大きくなるのに伴い、せん断帯の傾きの角度は、45°から55°程度まで大きくなる傾向を示す。したがって、非共軸パラメータが大きくなるとせん断帯の傾きの角度は大きくなること

が解析的に明らかとなった。

有限変形弾塑性理論に基づいた均一変形状態からのせん断帯の生成理論によると、非共軸パラメータ A の値が大きくなると水平面から測ったせん断帯の傾きの角度は 45° から 0° へと小さくなることが報告されている¹²⁾。本解析から得られた結果は既往の研究結果とは異なるが、本解析は非均一変形を考慮した解析であって、より現実の破壊現象に近いものと推察される。

破壊面の傾きの角度 α_f は、有効内部摩擦角 ϕ_e を用いることにより、 $\alpha_f = 45^\circ + \phi_e/2$ と表すことができる。わが国の沖積粘土の実験例によると有効内部摩擦角は $23.2^\circ \sim 23.4^\circ$ 程度であることが報告されている¹⁶⁾ ので、破壊面の傾きは 57.5° 程度となる。せん断帯は、ひずみの局所化と考えられ、载荷の進行に伴い変位の局所化と考えられる破壊面へと発展するものと推察される。そこで、せん断帯の傾きと破壊面の傾きが等しいものと仮定すると、共軸モデルの場合には、せん断帯の傾きを多少小さく見積もる傾向が認められる。一方、非共軸モデルの場合には、载荷に伴って形成されるせん断帯をより正確に示すことが可能である。したがって、非共軸モデルを用いた有限要素解析は、供試体の破壊現象を的確に表現できる可能性を有している。

5. 結 論

疑似分岐解析手法を用いた有限要素解析を行うことにより、载荷に伴ってせん断帯を形成するに至る正規圧密粘土供試体の変形挙動のシミュレーションを行った。その結果得られた主要な結論を以下に列記する。

(1) 非共軸モデルの方が、共軸モデルの場合に比較して、せん断帯が形成される軸ひずみ量がより小さな値となり、また、非共軸モデルの場合には、非共軸パラメータが大きいくほど、せん断帯が早く形成されることが示された。

(2) 形成されるせん断帯の傾きの角度は、非共軸パラメータが 0.005 より小さな範囲では、共軸モデルを用いた場合の傾きの角度と同じで 45° 程度となるが、非共軸パラメータが 0.005 より大きな範囲の場合には、非共軸パラメータが大きくなるのに伴い大きくなるのが解析的に明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, *Géotechnique*, Vol. 13, pp. 211-240, 1963.
- 2) Saada, A. S., Bianchini, G. F. and Liang, L.: "Cracks, bifurcation and shear bands propagation in saturated clays", *Géotechnique*, Vol. 44, No. 1, pp. 35-64, 1994.
- 3) Saada, A. S., Liang, L., Figueroa, J. L. and Cope, C. T.: Bifurcation and shear band propagation in sands, *Géotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp. 367-385, 1999.
- 4) Yatomi, C. and Shibi, T.: Antisymmetric bifurcation analysis in a circular cylinder of a non-coaxial Cam-clay model, *Proceedings of the International Symposium Deformation and Progressive Failure in*

- Geomechanics*, Nagoya, pp. 9-14, 1997.
- 5) 志比利秀, 矢富盟祥, 亀井健史: 平面ひずみ非排水圧縮条件下における供試体寸法比の変化が正規圧密粘土の分岐荷重に及ぼす影響, 土木学会論文集 No. 666/Ⅲ-53, pp. 181-192, 2000.
 - 6) 志比利秀, 亀井健史, 松森将樹: 分岐解析結果に基づいた分岐荷重近傍における力学的状態量の評価, 地盤と建設, Vol. 18, pp. 19-25, 2000.
 - 7) 志比利秀, 亀井健史, 岩田佳代子: 平面ひずみ非排水条件下における分岐荷重近傍の応力状態と土質定数の関係, 土木構造・材料論文集 (掲載予定).
 - 8) 志比利秀, 亀井健史, 東原聡子: 非共軸パラメータの違いが分岐荷重に及ぼす影響, 土木構造・材料論文集, No. 16, pp. 159-167, 2000.
 - 9) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Annealable behavior of saturated clay: an experiment and simulation, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 4, pp. 83-100, 1995.
 - 10) 小林一三, 飯塚 敦, 太田秀樹: 正規粘土供試体せん断時における局所変形の遷移, 土木学会論文集, No. 617/Ⅲ-46, pp. 1-18, 1999.
 - 11) 志比利秀, 亀井健史, 永吉雄大: 非排水圧縮せん断を受ける正規圧密粘土の局所ひずみの遷移, 地盤と建設, Vol. 18, pp. 41-16, 2000.
 - 12) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A., and Sano, I: General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-Clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 3, pp. 41-53, 1989.
 - 13) Ohta, H.: Analysis of deformations of soils based on the theory of plasticity and its application to settlement of embankments, *Doctor Engineering Thesis*, Kyoto Univ., 1971.
 - 14) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A., and Sano, I: Shear bands formation numerically simulated by a non-coaxial Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 4, pp. 1-13, 1989.
 - 15) Sekiguchi, H.: Rheological characteristics of clays, *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 1, pp. 289-292, 1977.
 - 16) 中瀬明男, 小林正樹, 勝野 克: 圧密および膨張による飽和粘土のせん断特性の変化, 港湾技術研究所報告, 第8巻, 第4号, pp. 103-143, 1969.