

# 微小・有限変形理論に基づく粘土の変形の局所化解析

## Numerical analysis for localized deformation of clay based on infinitesimal and finite deformation theory

宮田真由美\*・中井 照夫\*\*・檜尾 正也\*\*\*・村上 一徳\*\*\*\*

Mayumi MIYATA, Teruo NAKAI, Masaya HINOKIO and Kazunori MURAKAMI

\*名古屋工業大学大学院システムマネジメント工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*名古屋工業大学システムマネジメント工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*\*名古屋工業大学社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*\*\*水資源開発公団愛知用水総合事業部(〒470-0126 愛知県日進市赤池屋下 373)

To investigate the development of shear band, numerical analyses were carried out. These analyses were performed by finite element method with infinitesimal and finite deformation theory using *subloading  $t_j$  model*. This model can take into consideration the influence of density and confining pressure in three-dimensional stresses particularly. The results of these analyses show that the analyses using this model can describe the development of the shear bands in normally and over-consolidated clay.

Key Words: localization, clay, finite element method

### 1. はじめに

一般に、地盤材料の三軸試験や3主応力制御試験などの室内試験は、供試体が均質な変形をする要素レベルでの試験とみなされている。しかし実際には、応力の载荷に伴い、供試体内に不均質な変形が生じ、最終的にせん断帯が形成される。

本研究では粘土を供試体とした室内要素試験を一つの境界値問題と考え、有限要素解析によりこのような現象を再現し、供試体全体としての挙動とせん断帯形成過程の関連性について検証する。現在までに有限要素法による地盤材料の要素試験での変形の局所化解析がなされているが、多くの場合、土～水連成解析とした圧縮条件下で行われている<sup>1)~8)</sup>。しかし一相系有限要素解析においても十分に局所化解析が可能なことを確かめるため、今回は、排水条件下でのせん断試験を微小変形理論と有限変形理論の2通りについて、それぞれ正規圧密粘土と過圧密粘土に対して、比較的簡単な等硬化型モデルである *subloading  $t_j$  model*<sup>9)10)</sup>を用いて解析を行っている。なお、前報<sup>11)12)</sup>でも同じ構成モデルを用いた局所化解析を報告しているが、今回はアイソパラメトリック要素を用いて微小および有限変形理論で行っている(前報はCST要素で微小変形理論による解析のみ)。

### 2. 解析の概要

排水条件下の側圧一定平面ひずみ試験を想定した一相系有限要素解析を微小変形理論と有限変形理論の両理論に基づいて解析を行った。この解析では、試料は藤の森粘土とし、過圧密比の違いによる変形の差異を検討するため正規圧密粘土(OCR=1)および過圧密粘土(OCR=10)の2種類を対象とした。解析メッシュは図-1に示すように縦10cm、横5cmの供試体を対象とし、特に断らない限り、正方形アイソパラメトリック要素を縦40個と横20個の合計800個で構成した。前報<sup>11)12)</sup>では供試体の対称性を考慮して、1/4断面(縦5cm、横2.5cm)で解析を行っているが、本研究では供試体上部水平変位を拘束しないケースでの解析も行っているため全断面のメッシュを

用いている。境界条件は2種類設定している。図-2に示すように、case1は供試体下端面を完全固定、上端面には端面摩擦で断面積を変えずに水平方向への移動を自由とし、case2では上下端面とも完全固定とし、それぞれ鉛直方向に強制変位を与えた。解析に用いた *subloading  $t_j$  model* は、中間主応力の影響、塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性、密度や拘束応力の影響を同一のパラメータで表現できるという特徴がある。その土質パラメータを表-1に示す。表中の  $N$ は、平均有効応力  $p'=98\text{kPa}$  での等方応力状態(基準状態)における正規圧密粘土の間隙比である。初期応力は全て平均主応力  $p_0=196\text{kPa}$  の等方応力状態とし、供試体の平均軸ひずみ40%まで強制変位を与えている。

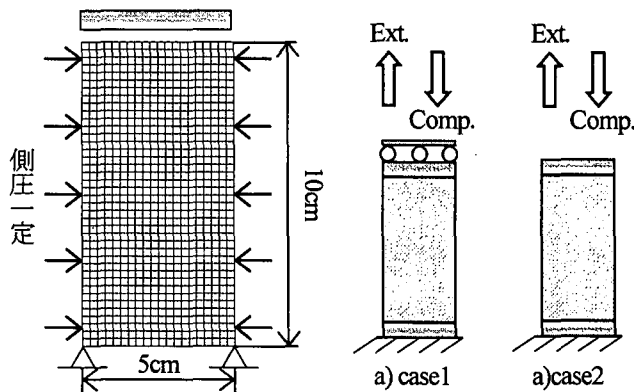


図-1 解析メッシュ

図-2 境界条件の概略図

表-1 土質パラメータ

|                                                      |        |                                   |
|------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|
| $\lambda$                                            | 0.0899 | Cam-clay model と同様のパラメータ          |
| $\kappa$                                             | 0.0198 |                                   |
| $N=e_{NC}$<br>at $p'=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$ | 0.83   |                                   |
| $R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp)}$              | 3.5    |                                   |
| $v_e$                                                | 0.2    | 降伏面の形状( $\beta=1$ で Cam-clay と同じ) |
| $\beta$                                              | 1.5    |                                   |
| $a$                                                  | 500    | 密度や拘束応力の影響                        |

### 3. 理想体の挙動

局所化を伴う解析を行う前に、まず、せん断中に供試体全体が均質な変形を起こす場合を理想体と想定した1要素での微小変形理論を用いた解析の結果について述べる。図-3に排水圧縮試験、図-4に排水伸張試験の結果を示す。それぞれの図の実線が正規圧密粘土、破線が過圧密粘土であり、a)は軸差応力( $t/s_0$ )～軸ひずみ( $\epsilon_a$ )関係、b)は軸差応力( $t/s_0$ )～平均有効応力( $s/s_0$ )関係で表した有効応力経路、c)は間隙比( $e$ )～軸ひずみ( $\epsilon_a$ )関係、d)は間隙比( $e$ )～平均有効応力( $s/s_0$ )関係を表す。ここでC.S.L.は限界状態線、N.C.L.は等方応力状態に対する正規圧密状態線である。 $s=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ は平均応力、 $t=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ は軸差応力を表し、グラフの応力はすべて初期の平均応力 $s_0$ で正規化して表示する。排水条件のため、全応力と有効応力は同じである。また側圧一定の平面ひずみ試験であることから、圧縮試験は最小主応力一定試験、伸張試験は最大主応力一定試験となる。図-3、図-4から、正規圧密粘土の場合は、軸ひずみの進行に伴って軸差応力がゆるやかに上昇しながら限界状態に到達し、間隙比は正規圧密曲線から徐々に小さくなっている。一方、過圧密粘土の場合

合は、軸差応力がピーク値に達した後、軟化しながら限界状態に到達し、間隙比はせん断初期では減少しているが、応力比が限界状態での応力比を超えてから膨張し始めている。これらのことから、解析で用いる構成式(subloading  $t_y$  model)<sup>9,10)</sup>は、少ないパラメータで、正規圧密粘土と過圧密粘土それぞれの特徴を表すことができ、要素としての挙動を妥当に表現できていると言える。

### 4. 圧縮せん断試験の解析結果と考察

#### 4.1 圧縮せん断試験 case1

まず case1 の圧縮せん断試験の解析結果について、マスとしての挙動を図-5(正規圧密粘土)と図-6(過圧密粘土)に示す。図中の○プロットは微小変形理論、△プロットは有限変形理論による結果である。比較のため、供試体が均一な変形をする場合(理想体)の解析結果を基本経路として実線で示す。また、マスとしての応力・ひずみ・間隙比と後述する個々の要素での応力・ひずみ・間隙比とを区別するため、マスとしての応力・ひずみ・間隙比にはそれぞれの記号の上に一を添えるものとする。ここでマスとしての軸差応力は上端面の節点荷重をその断

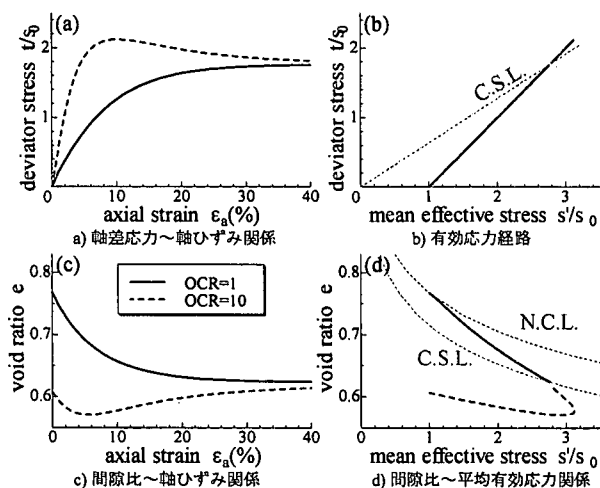


図-3 応力～ひずみ関係 (理想体・圧縮せん断試験)

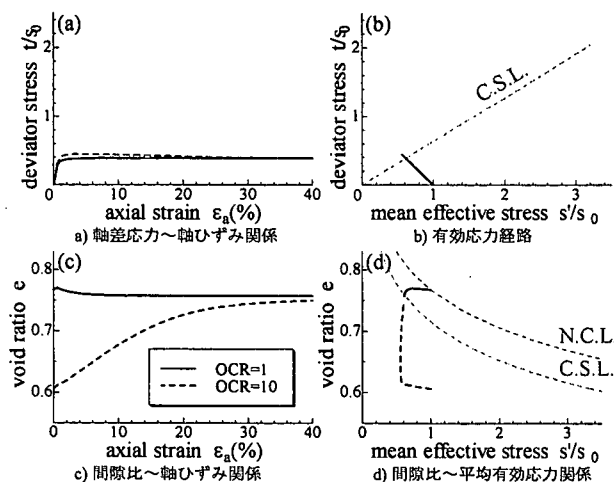


図-4 応力～ひずみ関係 (理想体・伸張せん断試験)

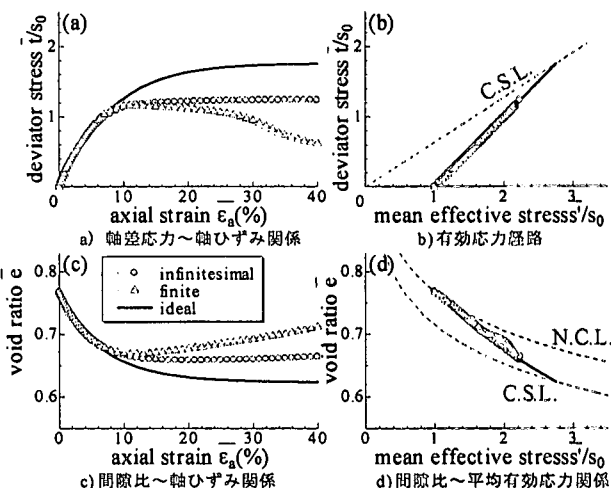


図-5 マスとしての応力～ひずみ関係  
(圧縮せん断試験 case1・正規圧密粘土)

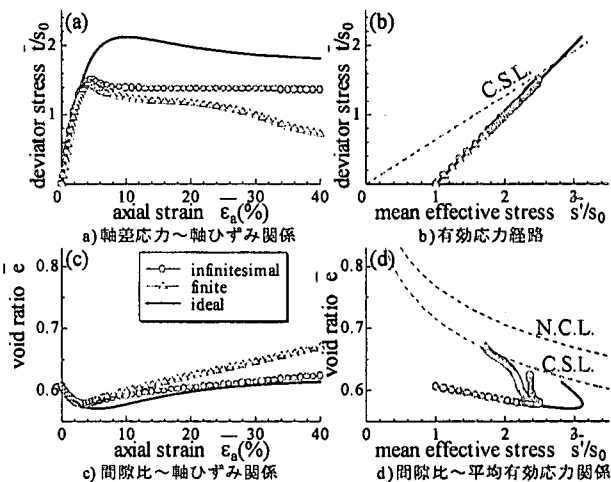


図-6 マスとしての応力～ひずみ関係  
(圧縮せん断試験 case1・過圧密粘土)

面積で除した値であり、マスとしての間隙比は供試体の各要素の間隙比を総和して平均化した値として示す。どの結果も、せん断初期には基本経路(理想体の応力～ひずみ挙動)に沿って軸差応力が増加する挙動を示しているが、ピーク値に達した後、軸差応力は基本経路から外れ、その後は低下の一途、もしくは低下ののち一定となる。その軸差応力のピーク値は、どの条件でも基本経路に比べて軸ひずみが小さい段階で生じており、理想体に比べ、低い値となっている。また正規圧密状態、過圧密状態ともに有限変形理論を用いた解析結果では、ピーク強度後の軸差応力の低下と間隙比の増加が、微小変形理論の結果より著しい。この有限変形理論による結果におけるピーク強度後の応力低下が、幾何学的非線形性の考慮の有無である。

次に図-7～図-10 に偏差ひずみ分布の変化を示す。正規圧密粘土、過圧密粘土ともに、載荷が進むにつれて上端面は左側に移動し、供試体の中心部から上端面の右端、下端面の左端に向かって偏差ひずみが大きくなり、せん断帯を形成していることがわかる。正規圧密粘土の場合は、偏差ひずみが大きい領域が広範囲に及び、せん

断帯が明確な線というより広がりをもった帯となっている。微小変形理論と有限変形理論による違いを比較しても、顕著な差はない。

また供試体内部の要素の挙動について、図-11～図-14 に示す。ここではどの条件も供試体中心部(①)、せん断帯上(②)、せん断帯の端(③)、せん断帯近傍(④)の同じ位置にある4種類の要素について、個々の挙動を比較する。過圧密粘土(図-13、図-14)では、供試体中心部①でピーク強度に至った後、すぐに軟化し、わずかな差ではあるが順次②、③と同じような挙動を示している。④については、それらからさらに遅れて軟化する挙動となっている。正規圧密粘土(図-11、図-12)でも同じように、せん断帯上では進行破壊的にピーク強度を向かえる。

体積ひずみの分布図を見ると、正規圧密粘土(図-15)では、全体的に右上から左下にかけての広範囲で圧縮される。過圧密粘土(図-16)では、せん断帯上の要素が膨張し始め、せん断が進むにつれて、微小変形理論では中心部の要素は圧縮し、せん断帯近傍の要素は膨張し続けるが、有限変形理論では中心部の要素も膨張を続けている。

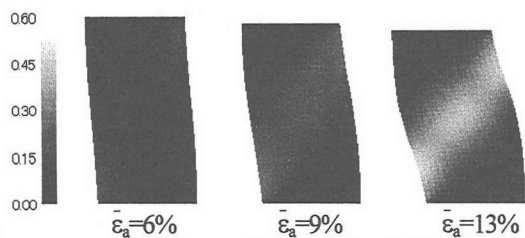


図-7 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case1・微小変形理論・正規圧密粘土)

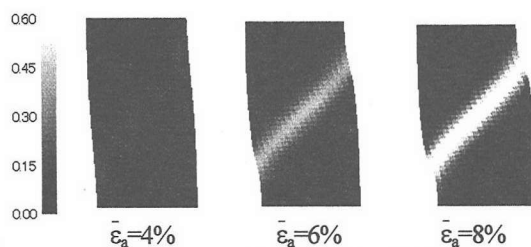


図-10 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case1・有限変形理論・過圧密粘土)

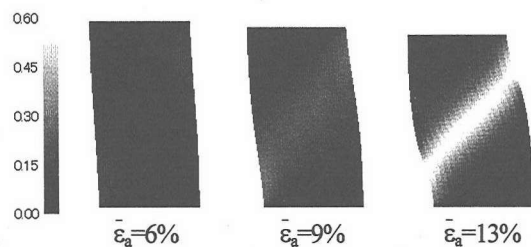


図-8 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case1・有限変形理論・正規圧密粘土)

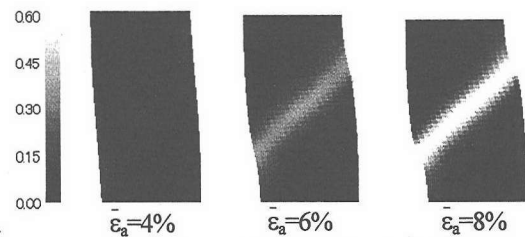


図-9 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

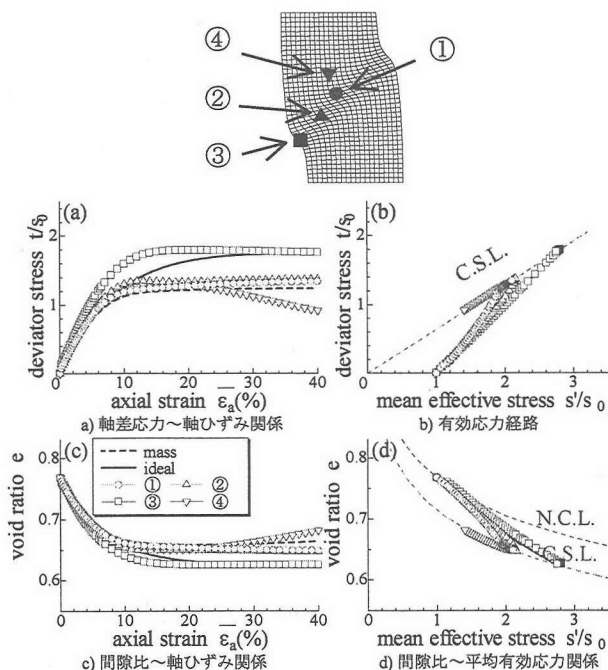


図-11 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case1・微小変形理論・正規圧密粘土)

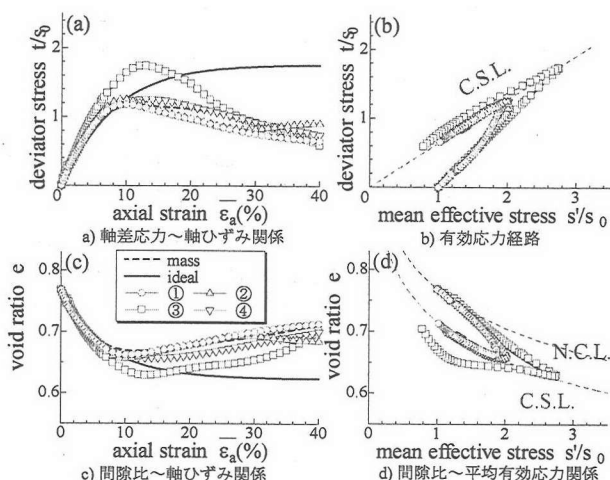


図-12 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case1・有限変形理論・正規圧密粘土)

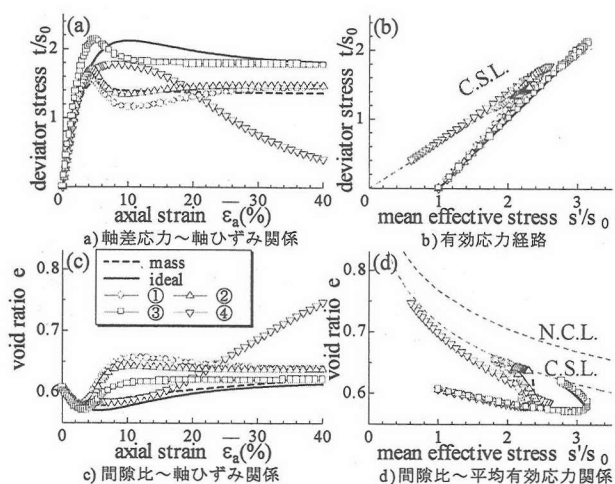


図-13 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

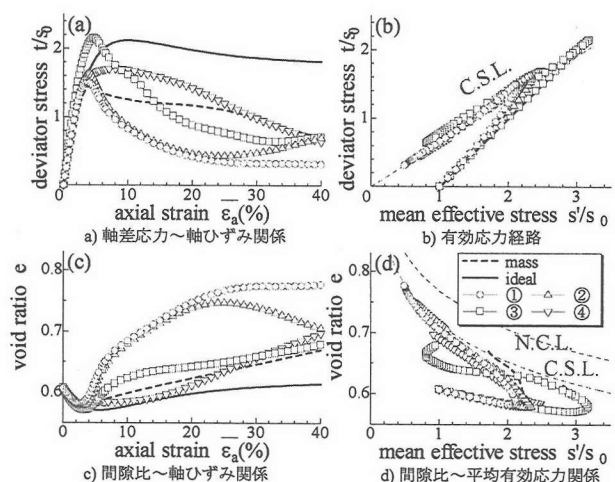


図-14 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case1・有限変形理論・過圧密粘土)

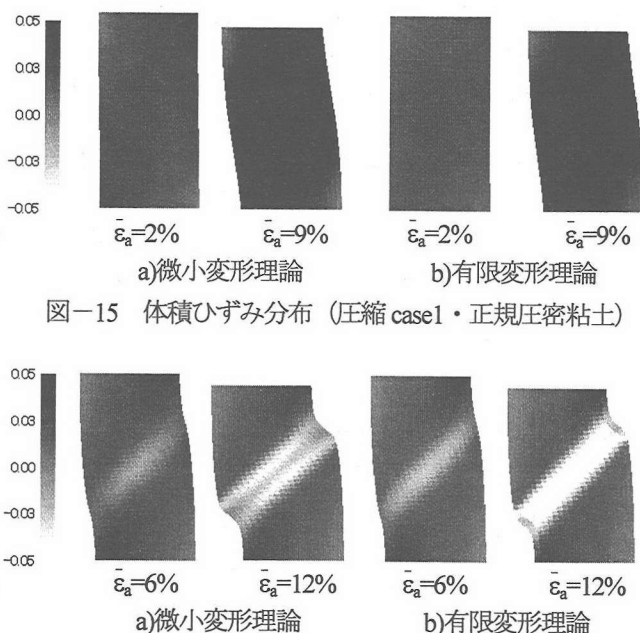


図-15 体積ひずみ分布 (圧縮 case1・正規圧密粘土)

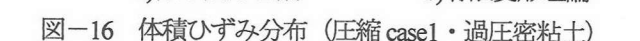


図-16 体積ひずみ分布 (圧縮 case1・過圧密粘土)

## 4.2 圧縮せん断試験 case2

case2 の境界条件での圧縮せん断試験の結果を図-17 (正規圧密粘土) と図-18 (過圧密粘土) に示す。case1 と同様に、軸差応力はピーク値に到達した後、低下もしくは一定となるが、そのピーク強度は基本経路に近い値であり、ピーク後の挙動も case1 ほど大きく変化せず基本経路に似たような挙動となっている。また、微小変形理論と比べると有限変形理論の方が軸差応力の低下が大きく、軸ひずみ 30% を越えた辺りで急激な低下が見られる。しかし、間隙比の違いは case1 ほど大きくない。

図-19～図-22 に示した偏差ひずみ分布の変化では、case1 とは異なり、中心軸固定のため左右上下対称に、中心部から両端面の 4 方向に向かって偏差ひずみの局所化が進んでいる。また、局所化の領域は case1 のように特定の領域に集中せず、広い領域に及んでいる。しかしながら case1 と同様に微小変形理論と有限変形理論はともに同じような変化となっている。

図-23～図-26 に要素の挙動を示す。着目した要素は、供試体中心部(①)、せん断帯上(②)、せん断帯の端(③)、せん断帯近傍(④)である。ここで、この 4 つの要素はどの条件でも同じ位置のものを扱い、供試体が上下左右対称的な変形であったため、全てを左下 1/4 断面から抽出した。正規圧密粘土では、間隙比の変化がどの要素とも同じような傾向を示し、特に微小変形理論では、似た変化を示す要素が広範囲に広がることがわかる。過圧密粘土では、供試体の中心部の要素から①⇒②⇒③の順に端部のせん断帯上の要素に向けてピーク強度に到達し、軟化する傾向が見られる。微小変形理論による結果 (図-25) では、中心部の要素は、軟化後に再硬化を経て再び軟化しているが、これは軟化領域が周囲の要素に広がるにつれて変形の局所化が周囲に移動したため周囲の要素

が大きく体積膨張し、その影響で中心の要素では膨張せず若干のひずみ硬化が起こったと考えられる。しかし全体的に case1 ほどは要素間の挙動に差異はなく、中心軸を固定、あるいは自由にするという拘束条件の違いがひずみの局所化の挙動に大きく影響していることが分かる。有限変形理論による結果(図-26)では、ピーク強度後の各要素の変化が大きく異なり、中心部の要素の強度低下が著しいことがわかる。この各要素での応力低下が、マスのとしての応力~ひずみ関係でも見られた有限変形理論の強度低下につながっている。

体積ひずみ分布図については、正規圧密粘土(図-27)では均一的に圧縮し、有限変形理論(図-28)では、せん断帯に沿って膨張している。

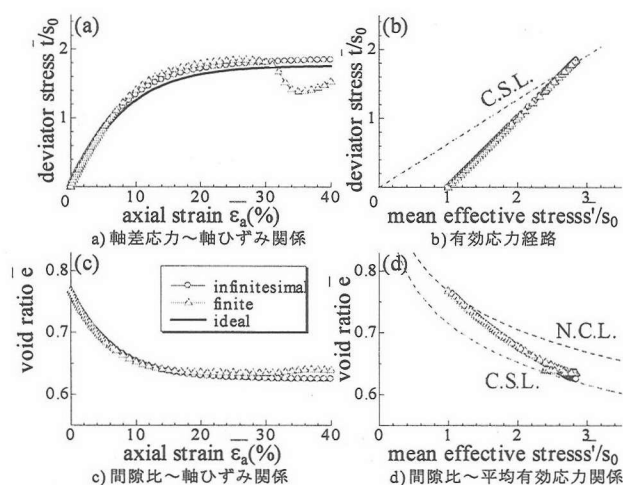


図-17 マスとしての応力~ひずみ関係  
(圧縮せん試験 case2・正規圧密粘土)

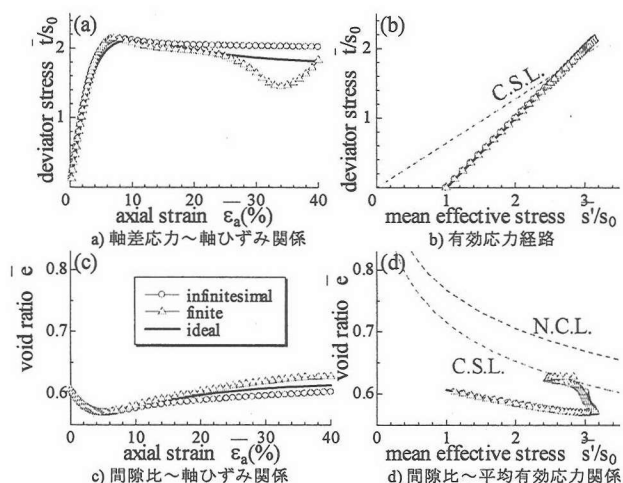


図-18 マスとしての応力~ひずみ関係  
(圧縮せん試験 case2・過圧密粘土)

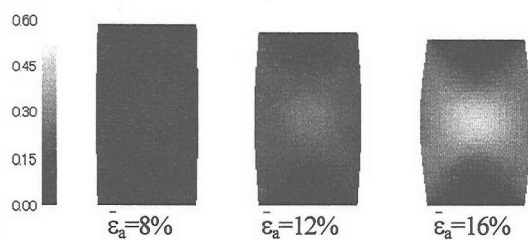


図-19 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case2・微小変形理論・正規圧密粘土)

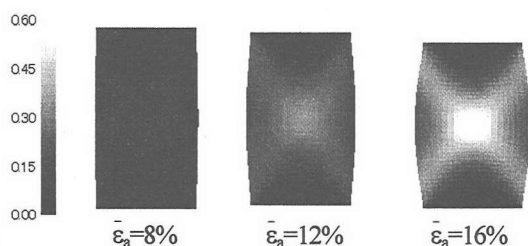


図-20 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case2・有限変形理論・正規圧密粘土)

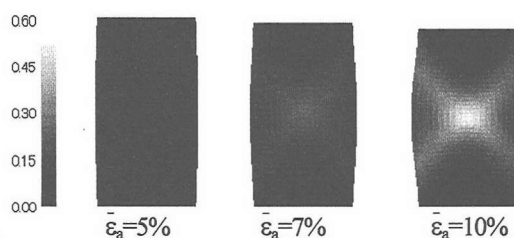


図-21 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case2・微小変形理論・過圧密粘土)

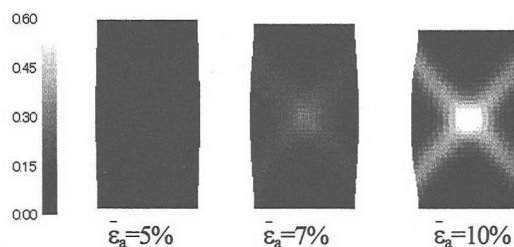


図-22 偏差ひずみの変化  
(圧縮 case2・有限変形理論・過圧密粘土)



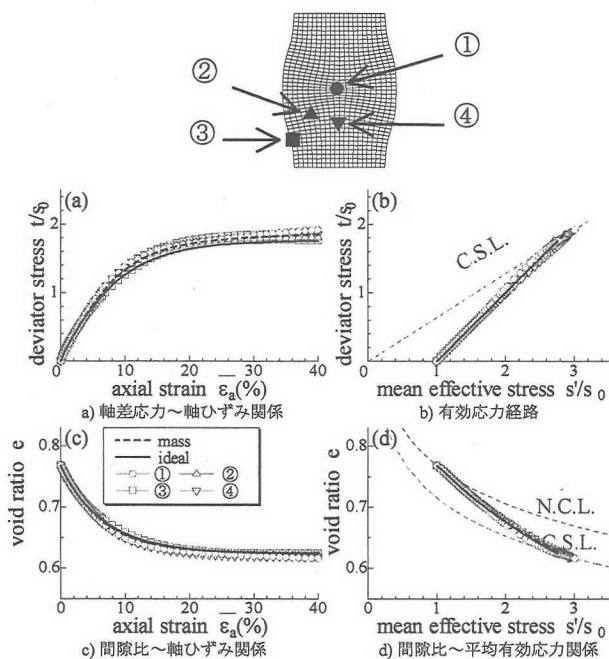


図-23 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case2・微小変形理論・正規圧密粘土)

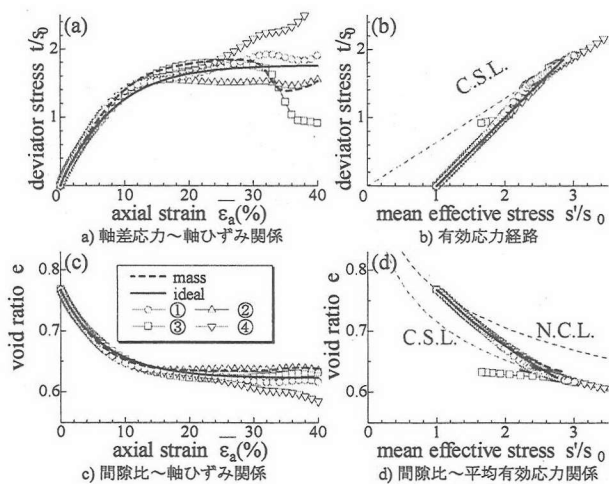


図-24 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case2・有限変形理論・正規圧密粘土)

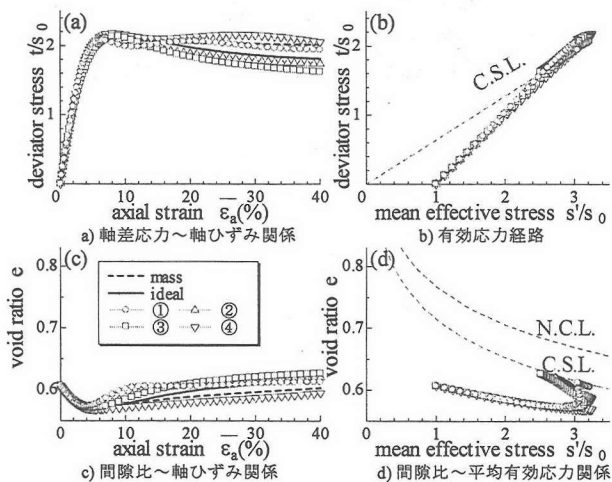


図-25 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case2・微小変形理論・過圧密粘土)

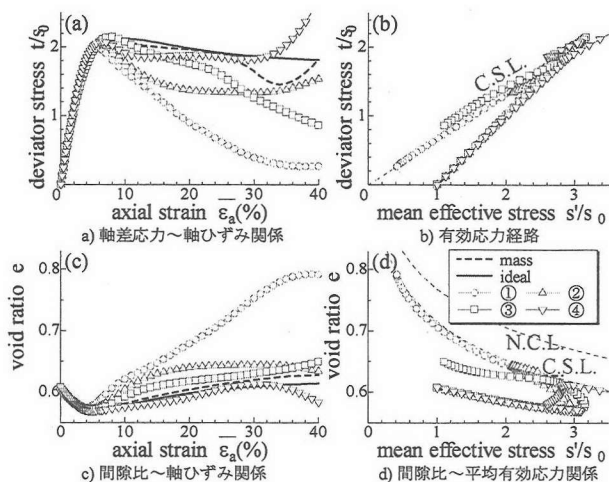


図-26 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(圧縮 case2・有限変形理論・過圧密粘土)

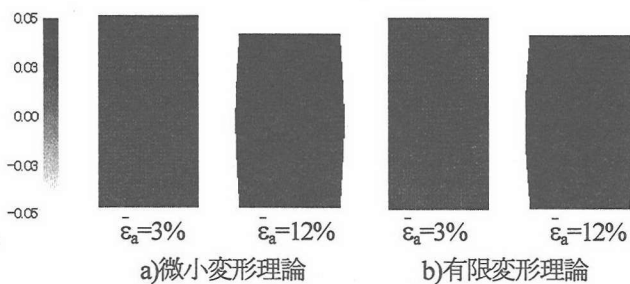


図-27 体積ひずみ分布 (圧縮 case2・正規圧密粘土)

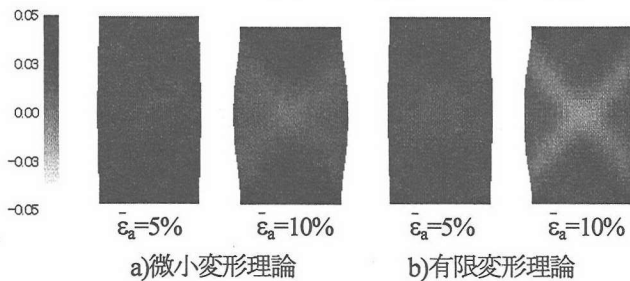


図-28 体積ひずみ分布 (圧縮 case2・過圧密粘土)

## 5. 伸張せん断試験の解析結果と考察

### 5.1 伸張せん断試験 case1

圧縮せん断試験と同様に、case1 の境界条件を想定した伸張せん断試験のマスとしての挙動を図-29 (正規圧密粘土) と図-30 (過圧密粘土) に示すが、今回、正規圧密粘土の微小変形理論による解析では軸ひずみが約 1.2%、有限変形理論による解析では約 26%、そして過圧密粘土の微小変形理論による解析では軸ひずみ約 12% のところでそれぞれテンションが生じたため、そこで計算を止めている。図 a) の軸差応力～平均軸ひずみ関係では、ピーク強度に到達した後も基本経路と大きな差異はなく、圧縮せん断試験時に見られたような基本経路との大きな強度差はみられない。また軸ひずみの進行に伴い、基本経路から離れて軸差応力が減少もしくは増加を示すとともに、図 c) の間隙比～軸ひずみ関係での挙動も基本経路との差が大きくなる。

図-31～図-33に偏差ひずみ分布の変化を示す。どの条件においても初期段階では供試体の右上端と左下端の要素の偏差ひずみが極端に大きくなり、最終的にせん断帯の形成に至っている。有限変形理論の正規圧密粘土（図-31）では、供試体の両端部から斜め方向に浅い角度で偏差ひずみの増加が広がり、その増加は下側の方が大きい。過圧密粘土ではどちらの理論（図-32、図-33）も、供試体の右上と左下、2ヶ所の特定の領域で偏差ひずみの増加が同じように見られる。いずれの解析でも供試体の中心部分では大きな偏差ひずみが生じていない。ただし、正規圧密粘土における微小変形理論の解析結果は、ピーク強度に達する前にテンションが発生したために、偏差ひずみ分布図を省略する。

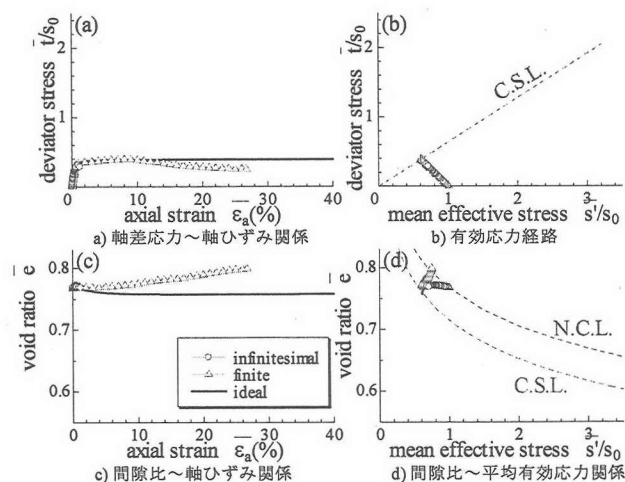


図-29 マスとしての応力～ひずみ関係  
(伸張せん断試験 case1・正規圧密粘土)

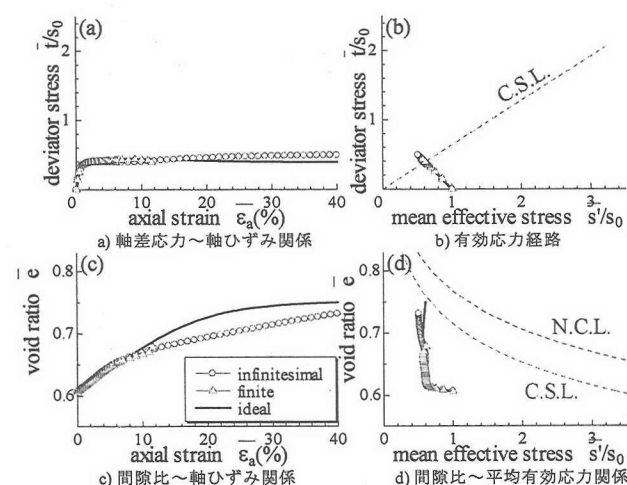


図-30 マスとしての応力～ひずみ関係  
(伸張せん断試験 case1・過圧密粘土)

次に正規圧密粘土の有限変形理論による個々の要素の挙動を下側のせん断帯上(①②)、上側のせん断帯上(③④)の要素について図-34に示す。図c)から、ピーク強度後の軸差応力が低下する過程で、下側のせん断帯上の要素(①②)の方が上側の要素(③④)よりも間隙比の変化が大きく、前述したように上下2つのせん断帯での変形の差となっている。また、図-35に過圧密粘土の微小変形理論の結果を示す。この場合では変形がほぼ上下対称となったため、供試体下部の局所的に偏差ひずみが大きくなる領域内の要素について比較する。供試体の端部(④)とその上部の少し離れたところ(③)の要素がまず軟化する。その2つの場所から水平方向および斜め方向にせん断帯が発展して①②の各要素とも軟化し、最終的にはくさびが形成される。図c)からわかるように、②③の間隙比の変化と④の間隙比の変化とは若干の違いが見られ、底面方向(④⇒①)と斜面方向(③⇒②⇒①)ではせん断帯形成の様子が異なることになる。

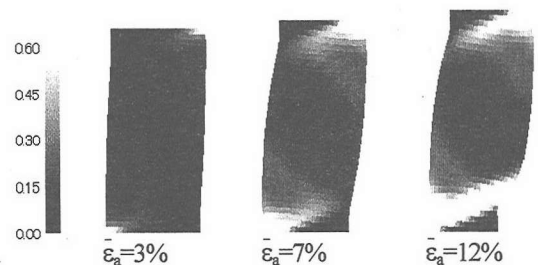


図-31 偏差ひずみの変化  
(伸張 case1・有限変形理論・正規圧密粘土)

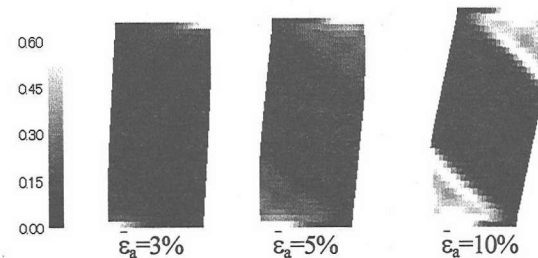


図-32 偏差ひずみの変化  
(伸張 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

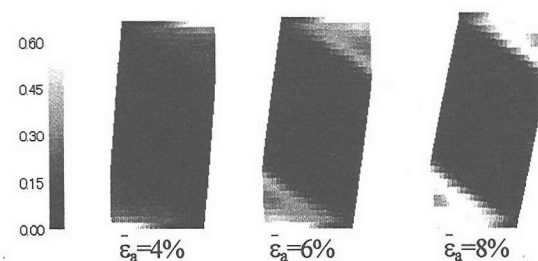


図-33 偏差ひずみの変化  
(伸張 case1・有限変形理論・過圧密粘土)

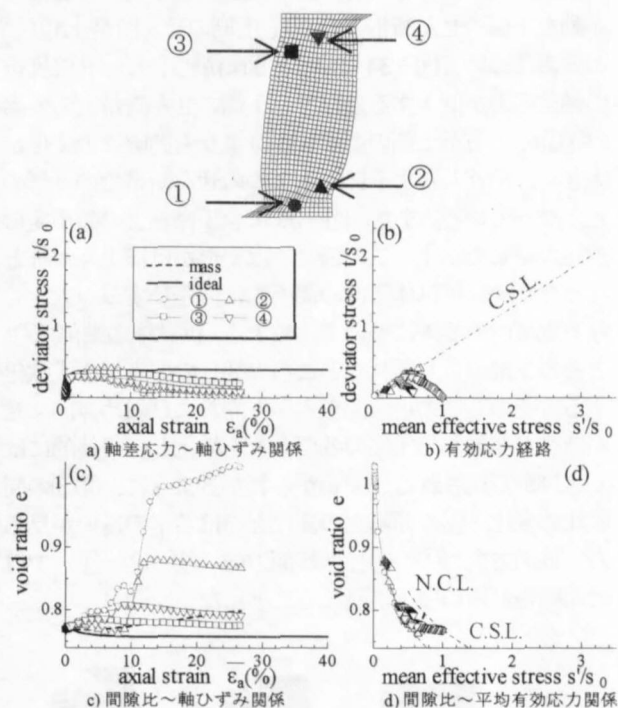


図-34：個々の要素の応力～ひずみ関係  
(伸張 case1・有限変形理論・正規圧密粘土)

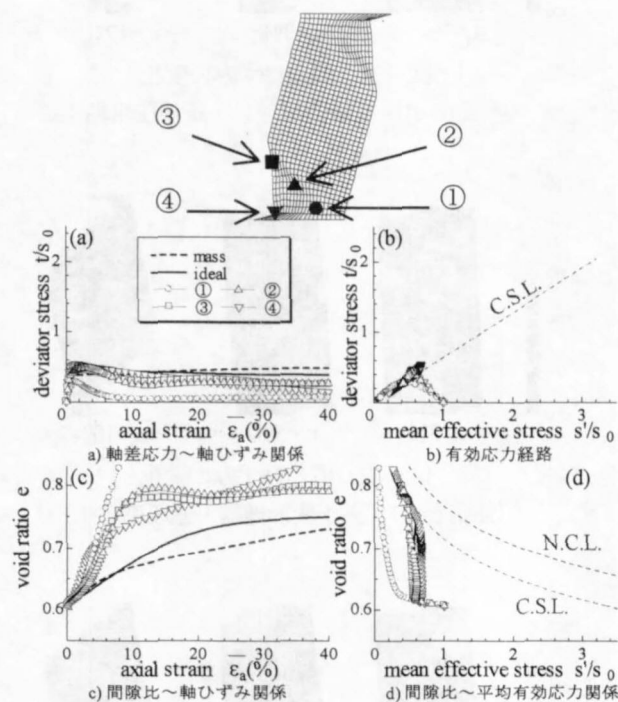


図-35：個々の要素の応力～ひずみ関係  
(伸張 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

## 5.2 伸張せん断試験 case2

case2 の境界条件での伸張せん断試験の結果を図-36 (正規圧密粘土) と図-37 (過圧密粘土) に示す。図 a) の軸差応力～軸ひずみ関係では、微小変形理論での解析結果は基本経路に沿った挙動となっているが、有限変形理論の結果の軸差応力がピーク値に到達した後、正規圧密粘土、過圧密粘土ともに基本経路から外れて低下している。ここで、図-36d)の有限変形理論における間隙比 (マスとしての平均的な間隙比) が  $N.C.L.$  を超えているが、平均有効応力もマスとしての平均的な応力であり、 $N.C.L.$  上に整理されることもある。

図-38～図-41 に示した偏差ひずみ分布の変化から、過圧密度や理論の違いにより変形が大きく異なっていることがわかる。微小変形理論では上下四隅から、有限変形理論では供試体の中心から、×印を描くようにせん断帯が形成されている。

個々の要素の変化について、図-42 に過圧密粘土の微小変形理論、図-43 に過圧密粘土の有限変形理論の結果を示す。微小変形理論を用いた結果では、対称性を考慮

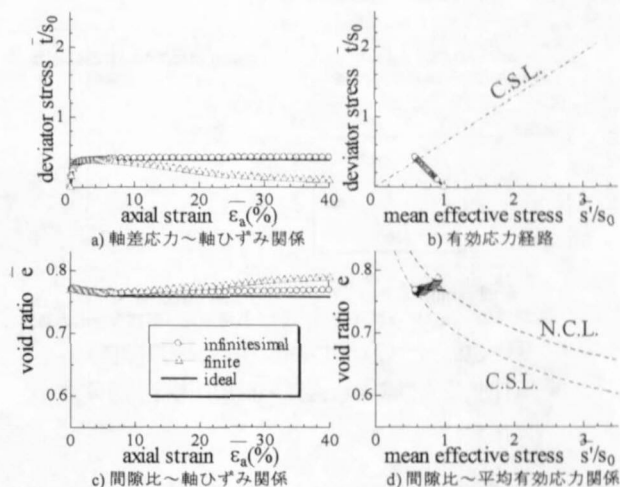


図-36 マスとしての応力～ひずみ関係  
(伸張せん断試験 case2・正規圧密粘土)

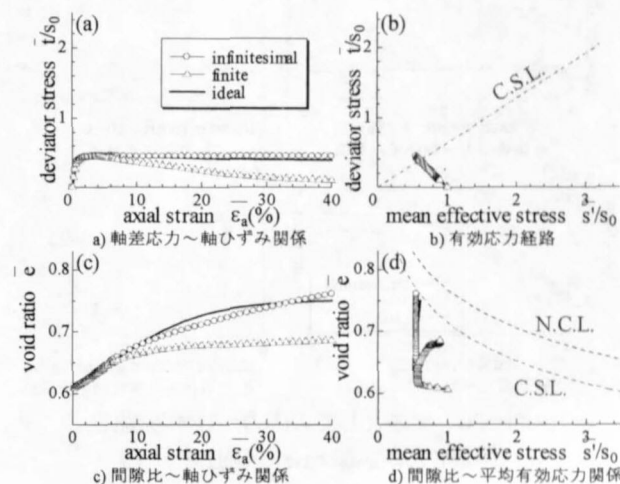


図-37 マスとしての応力～ひずみ関係  
(伸張せん断試験 case2・過圧密粘土)



して供試体の下側の部分において、2 方向のせん断帯が重なる部分の要素 (①)、各せん断帯の端の要素(②③④)を比較した。まず③の右下の要素から軟化が始まり、①、②の要素へと軟化が進展する。④の要素は途中で間隙比の変化が見られなくなる。有限変形理論による結果については、供試体中心部(①)、せん断帯上(②)、せん断帯の端(③)、せん断帯近傍(④)の要素を比較する。この場合、供試体の中心部から順に軟化が始まることがわかる。

また、体積ひずみ変化については、伸張試験では、偏差ひずみが大きい要素ほど膨張し、偏差ひずみ分布と同じような傾向を示したことは確認済みである。

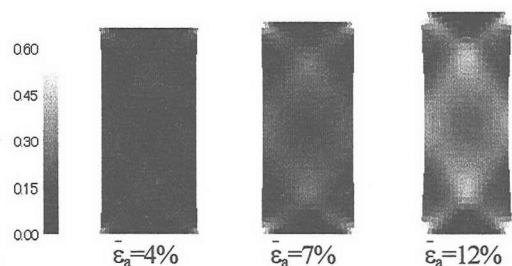


図-38 偏差ひずみの変化  
(伸張 case2・微小変形理論・正規圧密粘土)

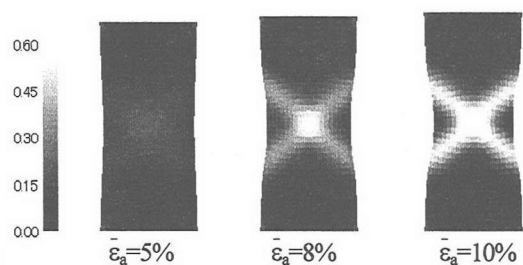


図-39 偏差ひずみの変化  
(伸張 case2・有限変形理論・正規圧密粘土)

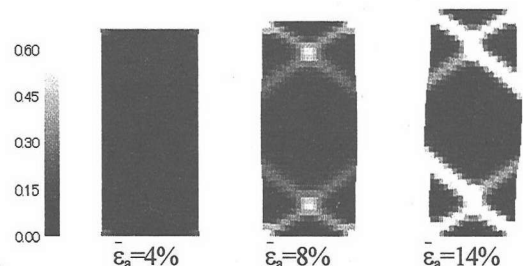


図-40 偏差ひずみの変化  
(伸張 case2・微小変形理論・過圧密粘土)

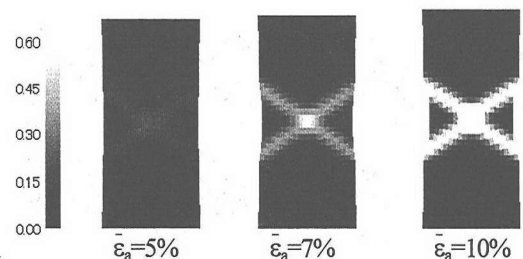


図-41 偏差ひずみの変化  
(伸張 case2・有限変形理論・過圧密粘土)

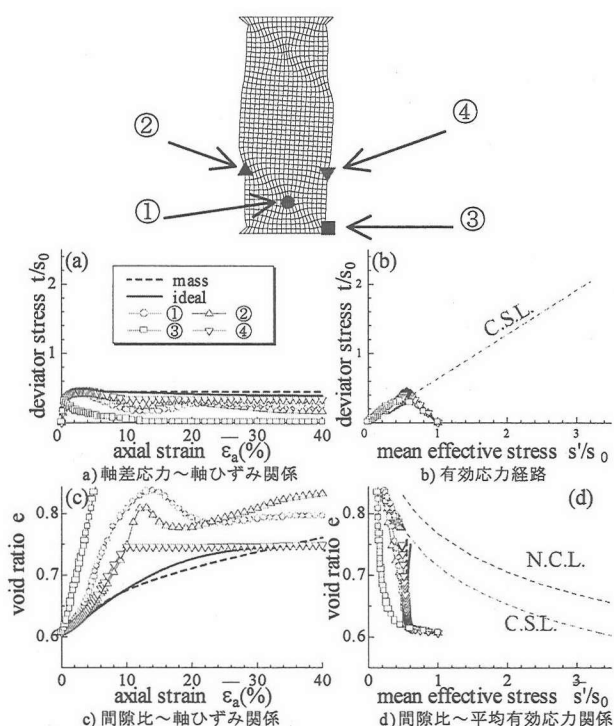


図-42 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(伸張 case2・微小変形理論・過圧密粘土)

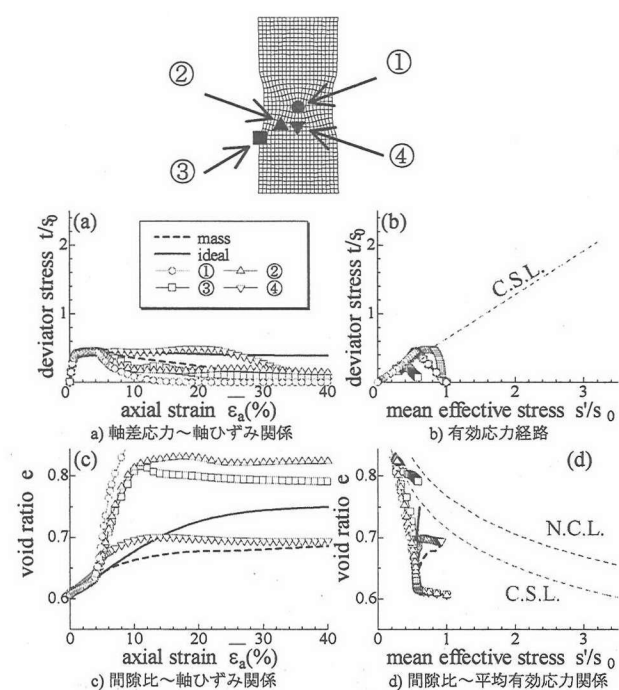


図-43 個々の要素の応力～ひずみ関係  
(伸張 case2・有限変形理論・過圧密粘土)

## 6. 解析メッシュの依存性

最後に解析メッシュ依存性を検討する。圧縮せん断試験の case1 において、微小変形理論 (図-44~図-46) と有限変形理論 (図-47~図-49) それぞれに対し、正方形要素 800 個の解析結果 (○) と要素数や形状を変えた解析結果との比較を行う。微小変形理論要素形状の違いについては、図-44 と図-47 に長方形要素を縦横 20 個ずつ、合計 400 個を用いた解析 (△) の応力~ひずみ関係を示し、要素数の違いについては、図-45 と図-48 に正方形要素 200 個による解析 (▽) と 3200 個による解析

(□) の応力~ひずみ関係を示す。また図-46 と図-49 に偏差ひずみ分布を示す。応力~ひずみ関係や偏差ひずみ分布から、要素形状や要素数による解析結果に大きな違いは見られない。しかし従来から指摘されているように、要素数が多い(要素が小さい)ほど、せん断帯の幅は狭く、マスとしての軸ひずみが小さな段階でせん断帯が形成される。これは、供試体に平均的に与えられる変位が同じであっても、その要素サイズが小さいほど、要素レベルでは大きなひずみとなるからである。なお、ピーク強度や残留強度などは、メッシュサイズの影響をほとんど受けていないことも解析では示している。

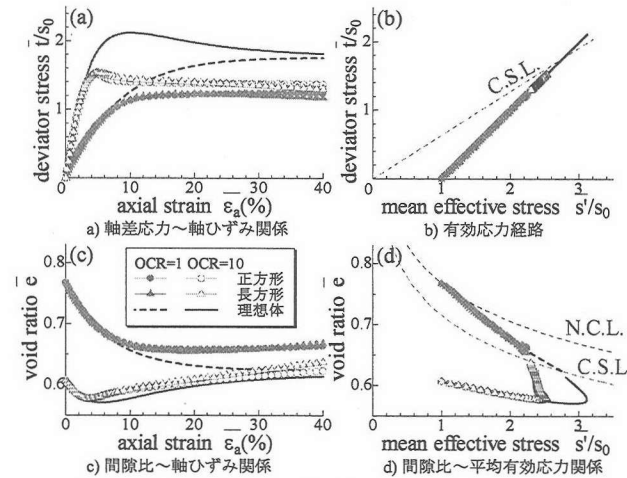


図-44 要素形状の違いによる応力~ひずみ関係  
(圧縮 case1・微小変形理論)

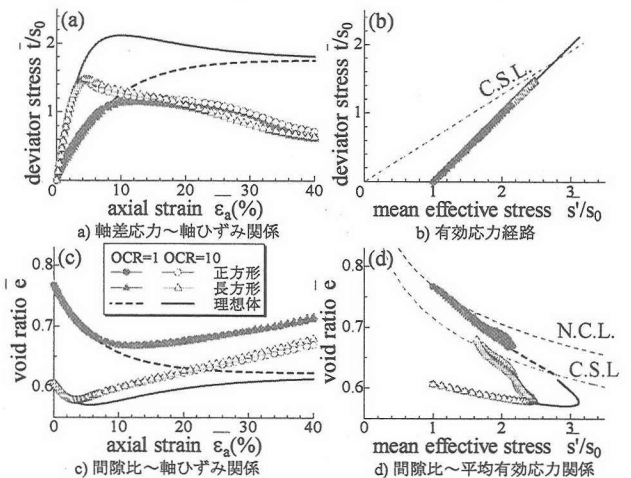


図-47 要素形状の違いによる応力~ひずみ関係  
(圧縮 case1・有限変形理論)

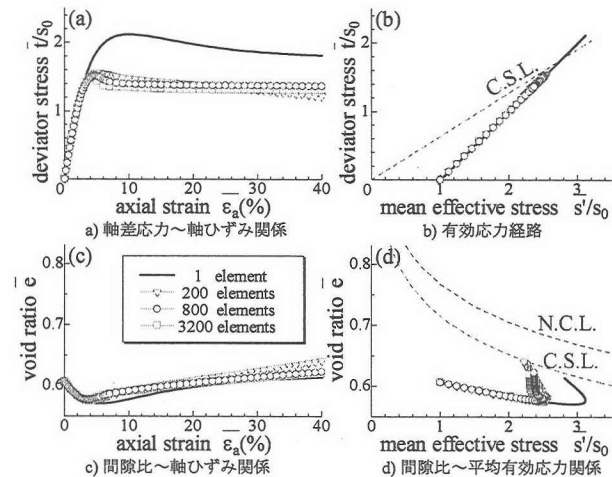


図-45 要素数の違いによる応力~ひずみ関係  
(圧縮 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

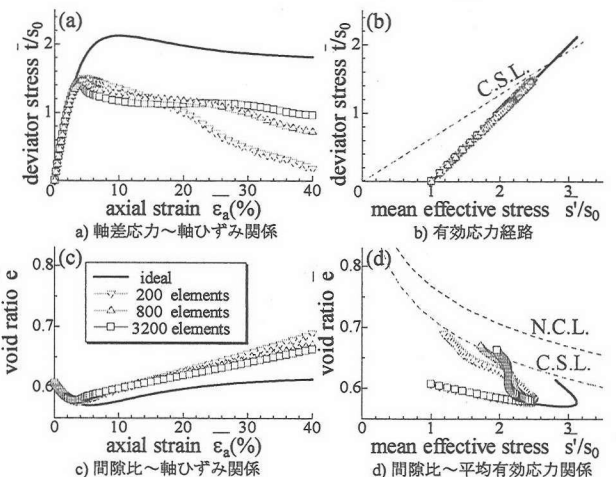


図-48 要素数の違いによる応力~ひずみ関係  
(圧縮 case1・有限変形理論・過圧密粘土)

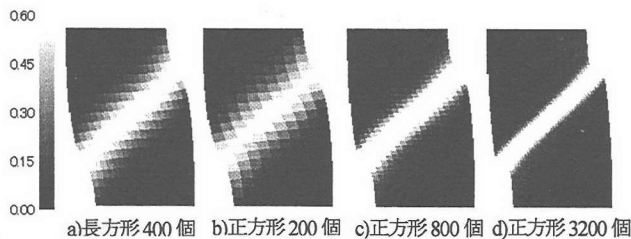


図-46 偏差ひずみ分布の比較:  $\bar{\epsilon}_a=10\%$   
(圧縮 case1・微小変形理論・過圧密粘土)

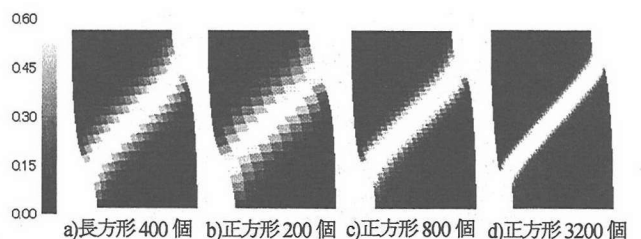


図-49 偏差ひずみ分布の比較:  $\bar{\epsilon}_a=10\%$   
(圧縮 case1・有限変形理論・過圧密粘土)

## 7. 結論

排水条件下の平面ひずみ試験の有限要素解析を境界条件や変形理論、粘土の密度を変えて行った結果、圧縮・伸張せん断試験ともに供試体内にせん断帯の形成を再現することができた。また想定する条件により、供試体の変形挙動や強度、せん断帯形成の様子が異なった。圧縮試験の場合は変形理論の違いや変位の拘束条件の違いに関わらず、供試体中心からせん断帯が形成される(せん断帯が袈裟懸けか×印の違いはあるが)が、伸張試験では変形理論や変位の拘束条件によってせん断帯の形成の方法が異なることが分かった。そしてピーク強度前や変形が小さい時には、微小変形理論・有限変形理論ともに顕著な差はないが、大変形になれば当然のこととして、有限変形理論による解析が優れている。

土～水連成解析ではなく土のみの1相系の解析で、さらに各要素に体積変化を許す排水条件下でありながらも、個々の要素の変形過程を表現でき、今回用いた等方硬化型弾塑性の構成モデル (*subloading  $t_y$  model*) の有用性が、変形の局所化解析においても確かめられた。また、前報での変形の局所化を起こさせやすい CST 要素ではなく、アイソパラメトリック要素を用いた微小変形理論や有限変形理論でもひずみの局所化解析が可能となった。

## 参考文献

- 1) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A. & Sano, I. (1989) : General theory of shear bands formulation by a non-coaxial Cam-clay mode, *Soils & Foundation*, 29(3), pp.41-53.
- 2) Asaoka, A. & Noda, T. (1995) : Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundary, *Soils & Foundation*, 35(1), pp.83-100.
- 3) Asaoka, A., Nakano, M. & Noda, T. (1997) : Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils & Foundation*, 37(1), pp.13-28.
- 4) Oka, F., Adachi, T. & Yashima, A. (1995) : A strain localization analysis using a viscoplastic softening model for clay, *Int. J. of Plasticity*, 11(5), pp.523-545.
- 5) 志比利秀・矢富盟祥・亀井健史(2000):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.
- 6) 佐藤啓介・山川優樹・池田清宏・鳥居邦夫(2002):分岐解析によるひずみ局所化現象における供試体形状と境界条件の影響に関する検討, 応用力学論文集, Vol.5, pp.329-338.
- 7) 志比利秀・亀井健史・矢富盟祥(2002):粘性土の平面ひずみ非排水伸張試験における分岐解析とその圧縮試験との比較, 応用力学論文集, Vol.5, pp.357-366.
- 8) S.Arimoto & A.Murakami(2002):Characteristics of localized behavior of saturated soil by EFG, *pro.of Iws-Calgary*, pp.169-172.
- 9) Nakai & Hinokio(2002):An isotropic hardening model for normally and over consolidated soils with  $t_y$ -concept and subloading surface concept, *pro.of Iws-Calgary*, pp.3-16.
- 10) 中井照夫・檜尾正也・城戸拓・西村智・宮田真由美(2002):正規・過圧密土の等方硬化モデル, 第37回地盤工学研究発表会, pp.379-380.
- 11) 中井照夫・檜尾正也・荒巻景介(2002):粘性土の変形の局所化メカニズムに関する解析的検討, 応用力学論文集, Vol.5, pp.339-348.
- 12) Hinokio, Nakai & Aramaki(2002):Numerical analysis using *subloading  $t_y$  model* for localized deformation of clay based on small deformation theory, *pro.of Iws-Calgary*, pp.75-82.

(2003年4月18日受付)