

粘性土の変形の局所化メカニズムに関する解析的検討

Numerical study on the mechanism of localized deformation for clay

中井 照夫*・檜尾 正也**・荒巻景介***
Teruo NAKAI, Masaya HINOKIO and Keisuke ARAMAKI

*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)

***名古屋市長高速道路公社(〒460-0002 名古屋市中区丸の内二丁目 1-36)

Generally localization of deformation is considered as boundary value problem in numerical analysis. Finite element analysis using soil-water coupling and finite deformation theory can express the shear band numerically. In this research, it is shown that the finite element analysis, using the constitutive model considering the influences of density and confining pressure, based on small deformation theory can express the localization of deformation for both the conditions of soil-water coupling and soil ground without water. Mechanism of development of the shear band is considered by investigating the behavior of each element.

Key word: localization, clay, finite element method

1. はじめに

粘性土を供試体として三軸試験や平面ひずみ試験を行った場合、変形が進むにつれて供試体内に不均質な変形が生じ、最終的にせん断帯の発生というひずみの局所化が見られる。一般にはこのような室内要素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すが、ここでは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せん断帯を解析的に表現する。更に、供試体全体としての挙動とせん断帯形成との関係を明らかにすると共に、供試体内の個々の要素挙動に着目することにより、せん断帯発生メカニズムを解明する。なお、これまでも有限要素法による粘土や砂のせん断帯(変形の局所化)解析が多く行われているが(例えば文献^{1),2),3),4)}、多くは有限変形問題、土と水の2相系連成問題、さらには構成モデルに非共軸項を導入した結果が報告されている。ここでは、簡単な等方硬化型の弾塑性モデルを用いて1相系の微小変形解析を行っても、構成モデルの中で地盤材料の特徴的な力学特性を評価してやればそれなりの現実的な変形の局所化問題の解析が可能であることを示す。

2. 解析の概要

正規圧密粘土および過圧密粘土(過圧密比 OCR=10)の側圧一定平面ひずみ試験を境界値問題として微小変形理論に基づいた有限要素解析によりシミュレーションする。解析には CST (Constant Strain Triangle; 定ひずみ三角形)要素を用いる。対象とする供試体は、高さ 10cm、幅 5cm

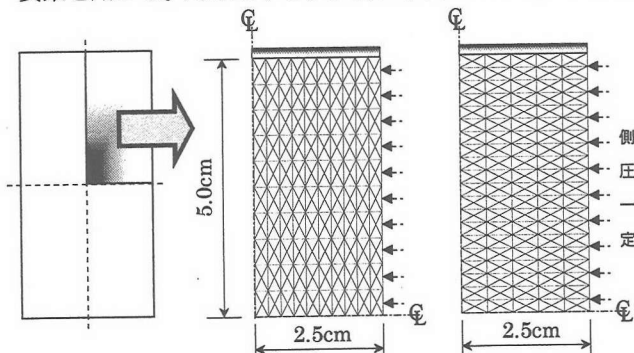


図-1 有限要素メッシュ(左:圧縮、右:伸張)

の長方形供試体で、解析対象は上下左右の対称性を考慮し 1/4 断面とする。解析メッシュは、圧縮、伸張の各試験で異なるものを用いるものとする。圧縮試験の場合には縦 10 個、横 10 個の長方形メッシュ(各要素が縦:横=2:1 の縦長長方形とする)を更に 4 つの三角形に分割した要素を用いた。伸張試験の場合には縦 20 個、横 5 個の長方形メッシュ(各要素が縦:横=1:2 の横長長方形とする)を同様に 4 つの三角形に分割した。解析に用いた有限要素メッシュを図-1 に示す。なお、メッシュサイズ依存性についてはここでは検討しない。境界条件としては、底面左下端を完全固定、底面水平方向及び左側面鉛直方向を可動、上端面は剛な摩擦を表現するため水平方向の変位を固定した。上端面に鉛直方向に強制変位を与えることで載荷をシミュレートしている。有限要素解析に用いる構成式としては、①変形・強度におよぼす中間主応力の影響、②塑性ひずみ増分方向におよぼす応力経路の影響、③変形・強度特性におよぼす密度・拘束応力の影響等、地盤材料の特徴的な挙動が表現可能な *subloading t_{ij} -model*^{5),6)}を用いる。なお、紙面容量の関係上構成モデルの負荷基準を含めた説明は参考文献5),6)に譲る。地盤材料は藤の森粘土とし、その土質パラメータを表-1 に示す。

表-1 土質パラメーター

λ	0.0899
κ	0.0198
$N(e_{NC} \text{ at } p=98\text{kPa})$	0.83
$R_{cs}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp)}$	3.5
β	1.5
v_e	0.2
a	500

これらの条件のもと、間隙水の流れを全く考慮しない排水条件を想定した 1 相系有限要素解析と、要素間の排水は許すものの境界面では非排水条件とした土〜水連成有限要素解析の両方を行った。なお、初期応力はすべて $p_0=196\text{kPa}$ の等方応力状態とし、軸ひずみ 20%まで強制変位を与えた。また、解析対象試料は過圧密比 OCR=1 の正規圧密粘土と OCR=10 の過圧密粘土を想定した。2

相系の連成問題として解いた非排水条件下の解析では、粘土の透水係数を $k=0.778 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ とした。

3. 理想体としての応力～ひずみ挙動

供試体が均一な変形をするとして得られる、平面ひずみ条件下の理想体としての完全排水条件下の応力～ひずみ関係を示す。図-2(a), (b), (c), (d)はそれぞれ均一な変形をする理想体の平面ひずみ圧縮試験の偏差応力(t/s_0)～軸ひずみ(ϵ_a)関係、偏差応力(t/s_0)～平均応力(s/s_0)関係で表した応力経路、間隙比(e)～軸ひずみ(ϵ_a)関係および間隙比(e)～平均応力(s/s_0)関係を表す。図中 N.C.L.は正規圧密線、C.S.L.は限界状態線を表す。また、図-3は平面ひずみ伸張試験における同様の関係を示す。ここに、 $s=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ は平均応力であり、 $t=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ は偏差応力を表す。また、以後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。なお、(b)図の応力経路からもわかるように、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を意味する。両図より、解析で用いる構成モデル (subloading t_y -model) が表-1の同一材料定数を用いているにも拘わらず、正規および過圧密粘土の特徴的な応力・変形・強度特性をよく表現していることがわかる。

図-4, 図-5は理想体としての平面ひずみ非排水試験の応力～ひずみ関係および間隙水圧の変化を示す。当然の結果として、間隙水圧の変化以外では圧縮試験(全応力 $\sigma_3=\text{const.}$)と伸張試験(全応力 $\sigma_1=\text{const.}$)の結果は同じである。ここでも、モデルが密度の違いによる差を含め粘土

の特徴的な非排水せん断挙動を適切に表現していることがわかる。

4. 排水せん断試験の有限要素解析結果と考察

4.1 排水圧縮せん断試験

図-6, 図-7に正規圧密粘土(OCR=1)、過圧密粘土(OCR=10)の排水圧縮試験における供試体全体のマスとしての挙動を示す。図-2同様、(a)図は軸差応力(t/s_0)～軸ひずみ(ϵ_a)関係を、(b)図は応力経路図、(c)図は間隙比(e)～軸ひずみ(ϵ_a)関係を、(d)図は間隙比(e)～平均主応力(s'/s_0)関係を示す。なお、グラフ中の実線は図-2に示した理想体の関係であり、これらを基本経路として考える。また、供試体全体での応力・ひずみと後に述べる個々の要素での応力・ひずみとを区別するために、マスとして考えた応力・ひずみの記号にはそれらの上にバーを付けるものとする。ここで、マスとしての軸差応力は上端面の節点荷重を断面積で除したものであり、マスとしての体積ひずみは供試体の全体的体積変化量を供試体の体積で除したものを表す。まず、(a)図では、正規圧密粘土、過圧密粘土ともに、軸差応力がピーク値付近に到るまでは、ほぼ供試体全体として理想体とほぼ同じ挙動を示すが、軸ひずみがあるところまで進むと基本経路からの分岐が生じて、軸ひずみの進行と共に軸差応力が急激に減少する。

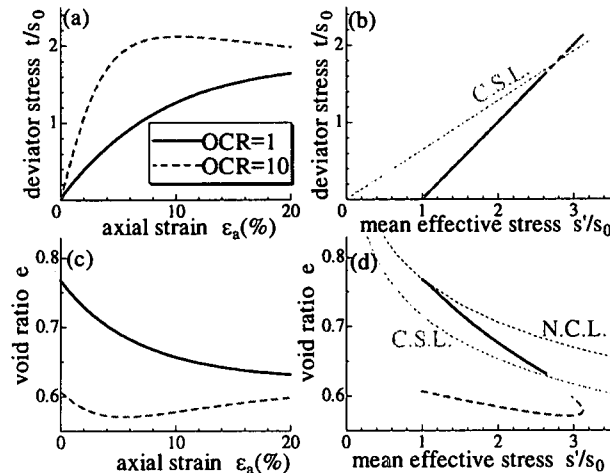


図-2 応力～ひずみ関係(排水圧縮、理想体)

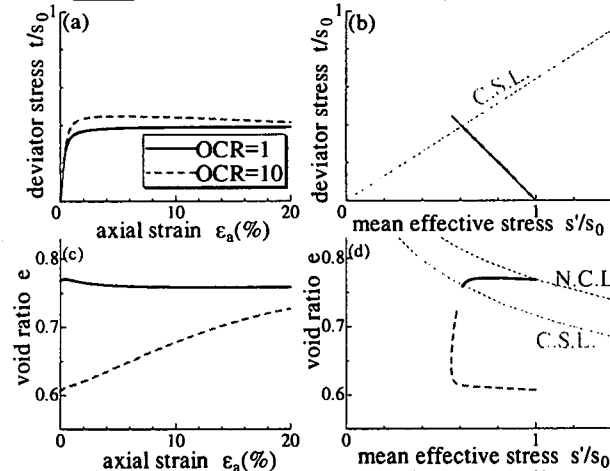


図-3 応力～ひずみ関係(排水伸張、理想体)

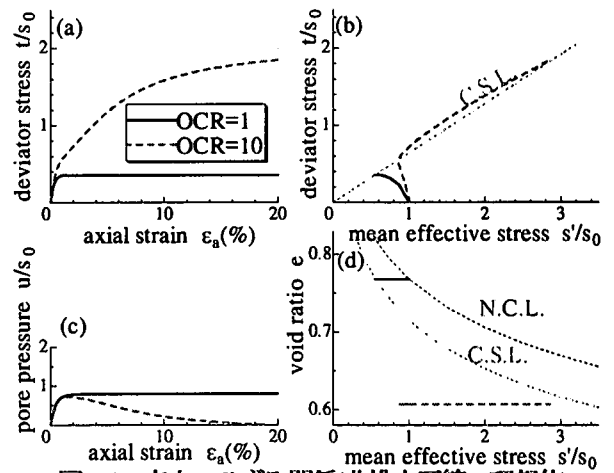


図-4 応力～ひずみ関係(非排水圧縮、理想体)

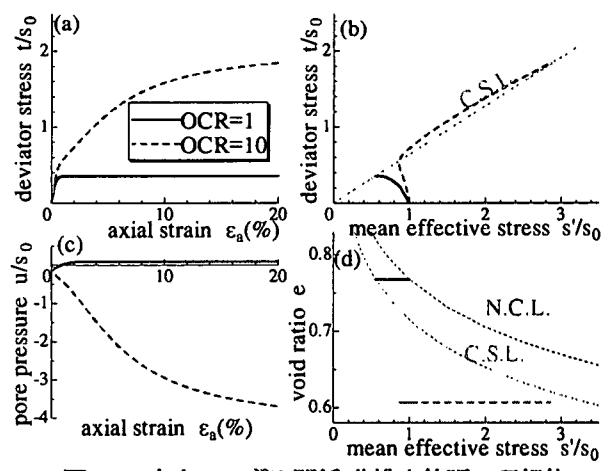


図-5 応力～ひずみ関係(非排水伸張、理想体)

さて、その基本経路との分岐が起こり始める軸ひずみは正規圧密粘土で約18%、過圧密粘土で約6%である。また、過圧密粘土では正規圧密粘土に比べてピーク強度付近で分岐が起きたときの軸差応力の低下量も大きい、その後すぐにマスとしてはすぐに完全塑性状態になる。

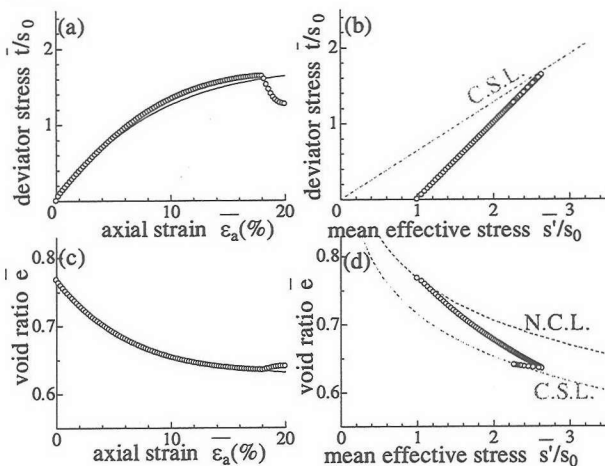


図-6 マスとしての応力～ひずみ関係 (排水圧縮、OCR=1)

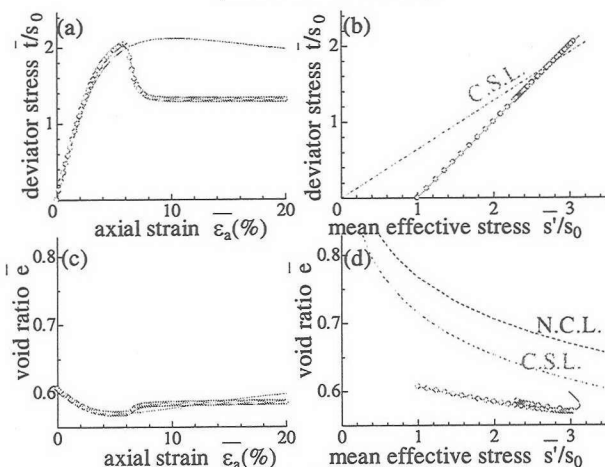


図-7 マスとしての応力～ひずみ関係 (排水圧縮、OCR=10)

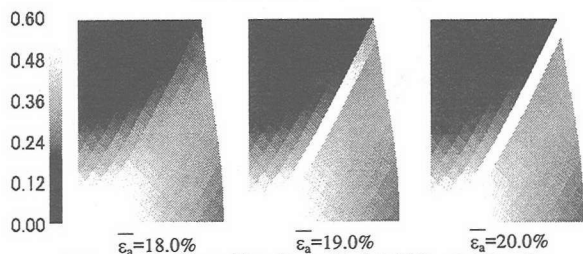


図-8 偏差ひずみ分布(排水圧縮、OCR=1)

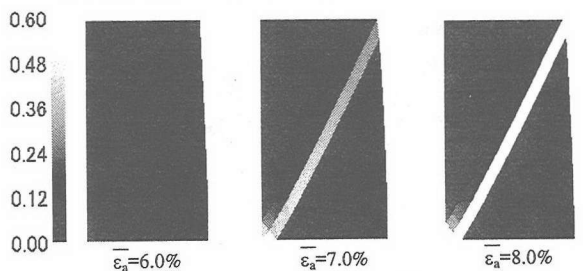
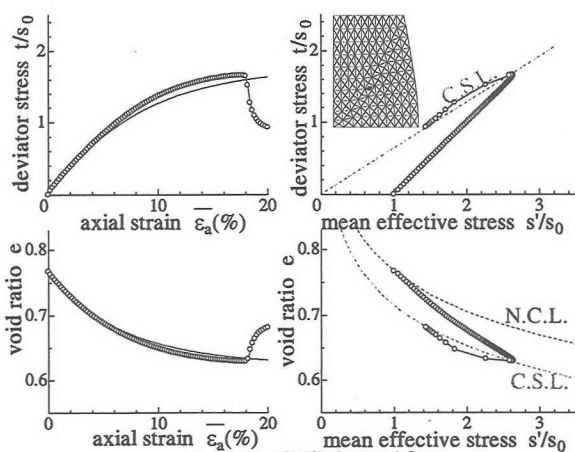
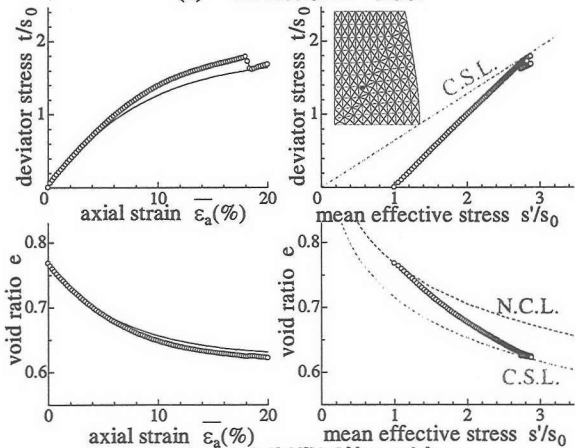


図-9 偏差ひずみ分布(排水圧縮、OCR=10)

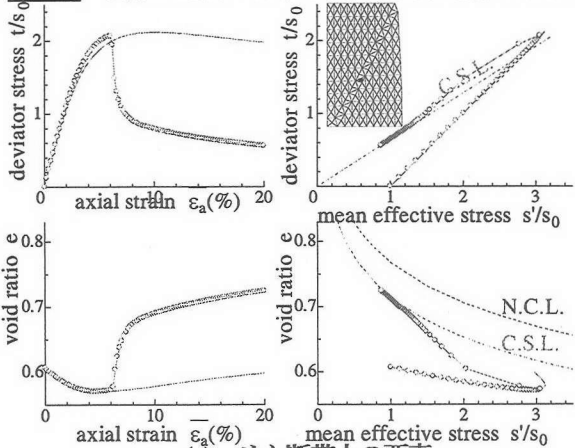


(a) せん断帯上の要素

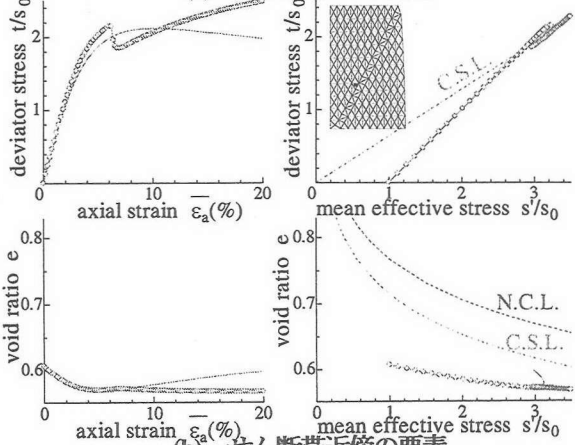


(b) せん断帯近傍の要素

図-10 要素の応力～ひずみ関係(排水圧縮、OCR=1)



(a) せん断帯上の要素



(b) せん断帯近傍の要素

図-11 要素の応力～ひずみ関係(排水圧縮、OCR=10)

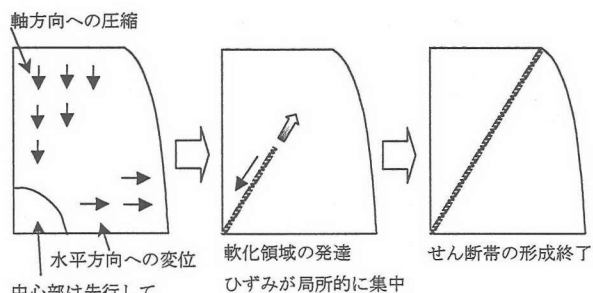


図-12 せん断帯発生メカニズム(排水圧縮)

(c)図から、基本経路との分岐が発生すると同時に、正規圧密であっても供試体全体として体積膨張を起こす。

次に図-8 に正規圧密粘土、図-9 に過圧密粘土について、基本経路との分岐が生じてからの供試体の変形の推移と偏差ひずみの分布を示す。マスとしての挙動は分岐が発生する前ではいずれもほぼ均一な変形をしているが、分岐が発生すると供試体内に徐々に変形の局所的な集中が見られ、最終的にせん断帯の形成へと到っている。またせん断帯の発生は正規圧密、過圧密とも供試体の中央部から周辺に向かって発達する。

図-10 に正規圧密粘土、図-11 に過圧密粘土について a)せん断帯上の要素、b)せん断帯の近傍要素の挙動を示す。各々の図中の左上、左下の図の横軸のひずみはマスとしての軸ひずみである。a)のせん断帯上の要素ではマスとしての挙動に基本経路との分岐が発生すると同時に急激なひずみ軟化・体積膨張が見られる。一方、b)せん断帯近傍要素ではせん断帯発生時にわずかな軟化が見られるもののその後ひずみ硬化に転じる。負のダイレイタンスを示す正規圧密粘土と正のダイレイタンスを示す過圧密粘土の両方の大まかな傾向は同じであるが、過圧密粘土では上述の傾向が顕著である。

以上結果をまとめ、せん断帯の発生メカニズムについて考える。境界条件として供試体上端面の水平方向の変位を拘束する条件を与えたため、供試体の変形は軸方向の圧縮ひずみと共に水平方向への膨張ひずみを伴い、図-12 のようになる。この時供試体中心部では水平方向の拘束がないのでどの要素よりも早く大きな体積膨張が生じる。その結果、供試体中心部では体積膨張によりその要素が發揮できる強度が低下して、どの要素よりも早く軟化に到る。これがせん断帯発生を引き金となって軟化領域を拡大しながらひずみが局所的に集中し、結果としてせん断帯を形成すると考える。

4.2 排水伸張せん断試験

図-13、図-14 は伸張せん断時の正規圧密粘土および過圧密粘土(OCR=10)のマスとしての挙動を示す。ここでも、図中の実線は理想体としての関係を表している。これらの図より、圧縮せん断時同様、過圧密粘土のマスとしての応力～ひずみ挙動がせん断初期には理想体に近くてもせん断変形の進行とともに理想体のそれから大きくずれることがわかる。特に過圧密土のピーク強度以後のマ

スとしての体積変化は変形の局所化によりかなり過小評価することになる。

図-15 および図-16 は正規および過圧密土の伸張せん断時の偏差ひずみ分布の解析結果を表す。過圧密土で

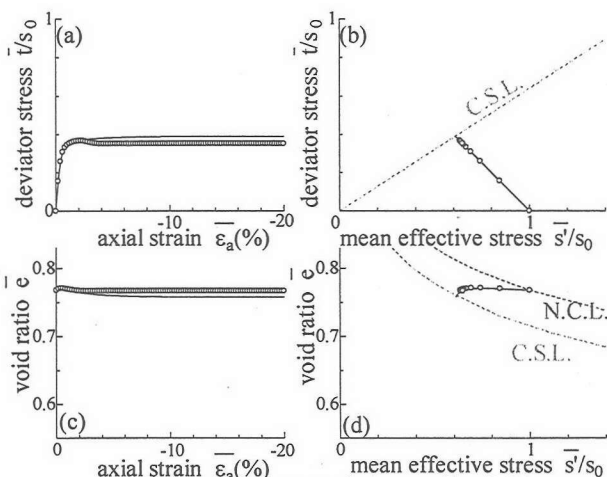


図-13 マスとしての応力～ひずみ関係

(排水伸張、OCR=1)

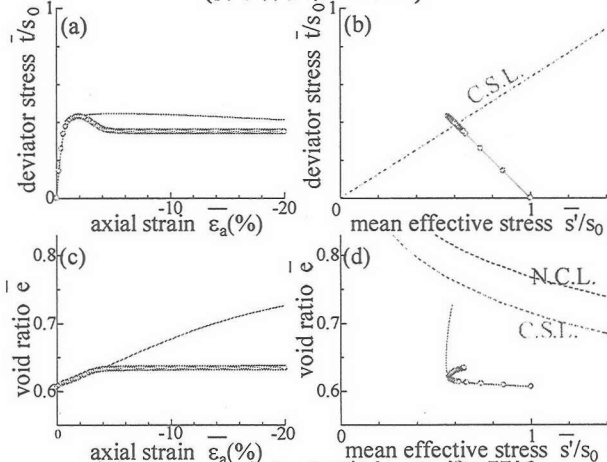


図-14 マスとしての応力～ひずみ関係

(排水伸張、OCR=10)

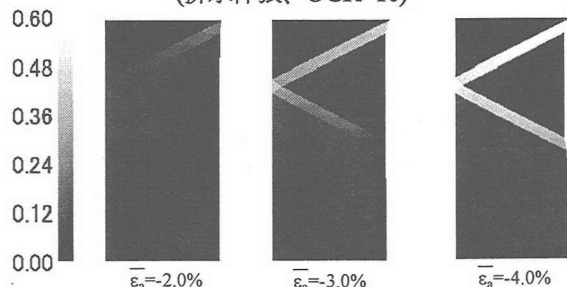


図-15 偏差ひずみ分布(排水伸張、OCR=1)

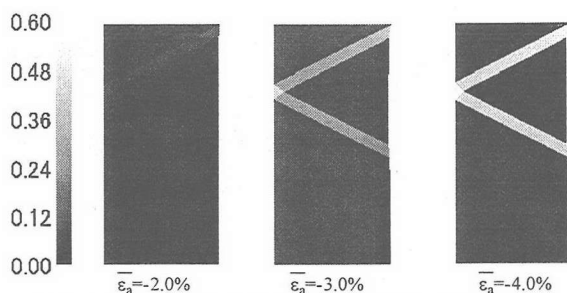
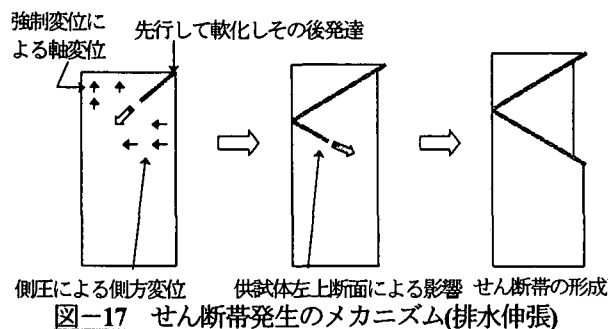


図-16 偏差ひずみ分布(排水伸張、OCR=10)



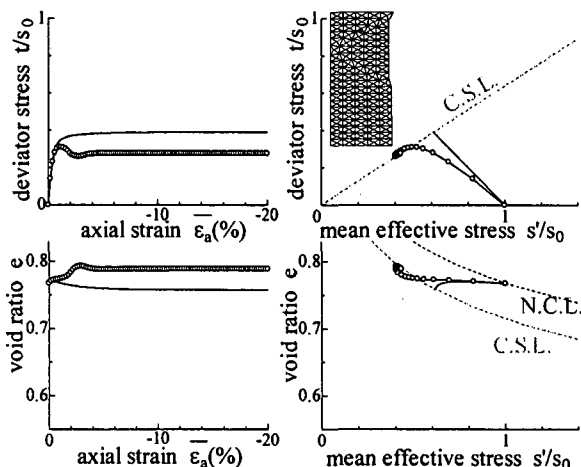
は局所的なひずみの集中が見られ始めると急激にせん断帯として発達するのは圧縮時と同じであるが、伸張せん断では圧縮せん断に比べ小さい軸変位でせん断帯が発生する。また、圧縮せん断時には供試体中央部からせん断帯が発達するのに対し、伸張せん断時には逆に供試体周辺部から内部に向かってせん断帯が発達する。すなわち、同じ初期条件であっても、境界条件の違いによりせん断帯の発達の仕方が異なる可能性を示唆している。理由は圧縮せん断時の図-12 同様、図-17 のように説明できる。伸張せん断変形時には圧縮ひずみを生じる方向(水平方向)とそれに直交する膨張ひずみを生じる方向(鉛直方向)があるが、供試体端部では水平方向の圧縮ひずみを拘束するためここで体積膨張が最も生じやすい。すなわち、膨張ひずみに対して圧縮ひずみをもっとも生じにくいところで相対的に間隙比が大きくなり、そこでの強度が最も小さくなりせん断帯発生の trigger になる。このことは圧縮せん断と伸張せん断の解析条件の違い、すなわち強制変位を与える方向と境界条件を考えれば容易に理解できる。したがって、このような地盤材料のせん断帯解析ではその特徴的な材料特性はもとより、間隙比、拘束応力が変わっても連続的にその挙動を説明できるモデルが必要である。

図-18 および図-19 はせん断帯上およびその近傍の要素の応力～ひずみ関係や間隙比の変化を示している(ここでも、実線は理想体の関係を示す)。せん断帯上の要素では理想体よりも間隙比が大きくなった後に限界状態線に至っているに対し、その近傍の要素では有意な間隙比の増加も見られない。非排水条件等の体積変化の拘束条件を入れ2相系で解いたときは、体積膨張する要素とその近傍の体積圧縮する要素が必然的にできるため変形の局所化が起こるという説明はこれまでもなされているが、1相系であっても変形の適合性から結果として同じような解析結果が得られることになる。

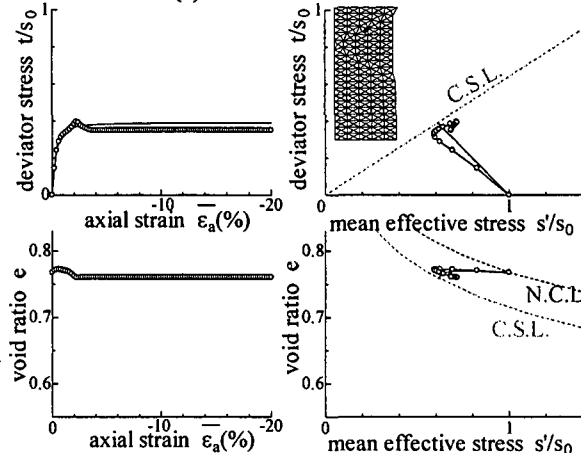
5. 非排水せん断試験の有限要素解析結果と考察

5.1 非排水圧縮せん断試験

図-20、図-21 に非排水圧縮試験(平均軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a = 0.167\%/day$)のマスの結果を示す。各図はそれぞれ偏差応力(t/s_0)～軸ひずみ(ϵ_a)関係、偏差応力(t/s_0)～有効平均応力(s'/s_0)関係で表した有効応力経路、間隙水圧(w/s_0)～軸ひずみ(ϵ_a)関係および間隙比(e)～有効平均応力(s'/s_0)関係を示す。

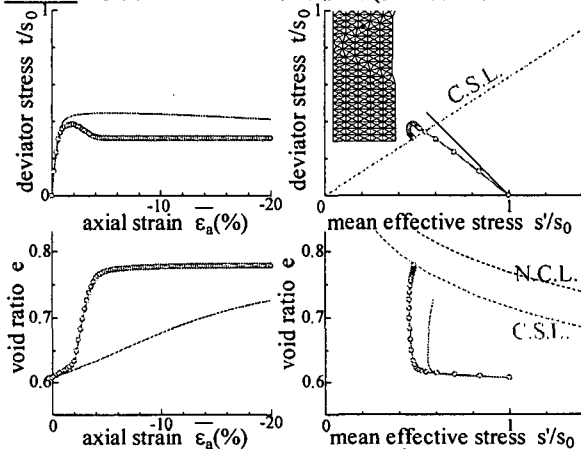


(a) せん断帯上の要素

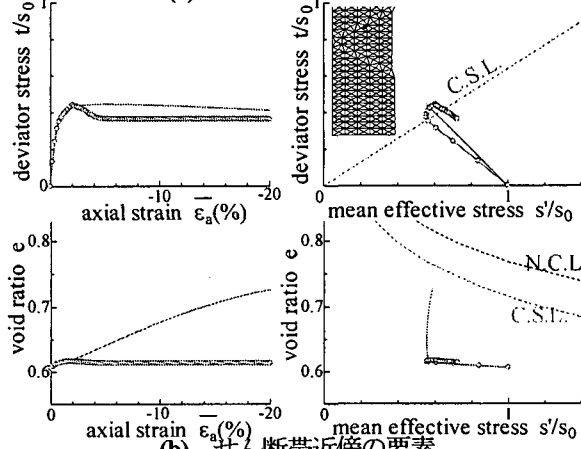


(b) せん断帯近傍の要素

図-18 要素の応力～ひずみ関係(排水伸張、OCR=1)



(a) せん断帯上の要素



(b) せん断帯近傍の要素

図-19 要素の応力～ひずみ関係(排水伸張、OCR=10)

力(s'/s_0)関係を表す。なお、マスとしての間隙水圧は、通常のせん断試験での間隙水圧の測定にあわせて供試体上端部中央の要素の間隙水圧で代表させている。マスとしての有効応力も、マスとしての全応力からこの間隙水圧を引くことにより求めている。また、非排水試験の解析結果でも排水試験の結果同様、理想体の結果を実線で示す。ここに、両図のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a=0.167\%/day$ のせん断

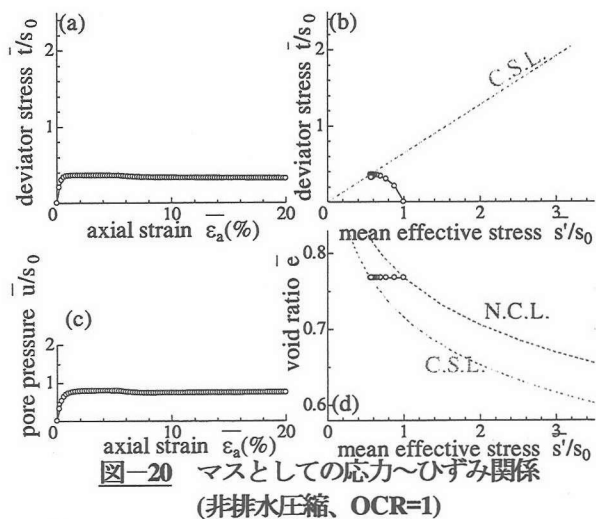


図-20 マスとしての応力～ひずみ関係
(非排水圧縮、OCR=1)

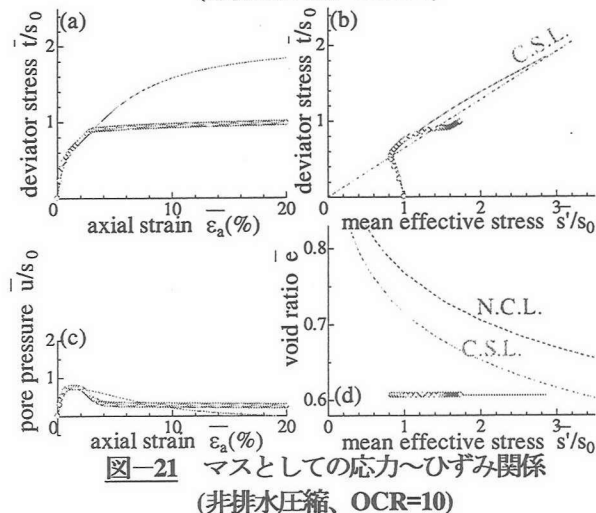


図-21 マスとしての応力～ひずみ関係
(非排水圧縮、OCR=10)

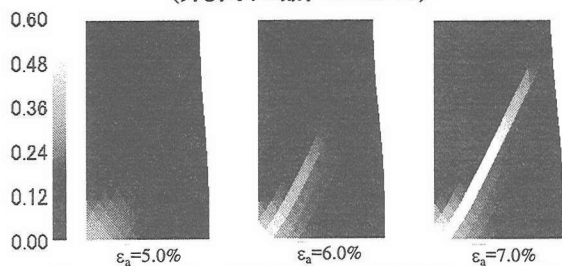


図-22 偏差ひずみ分布(非排水圧縮、OCR=1)

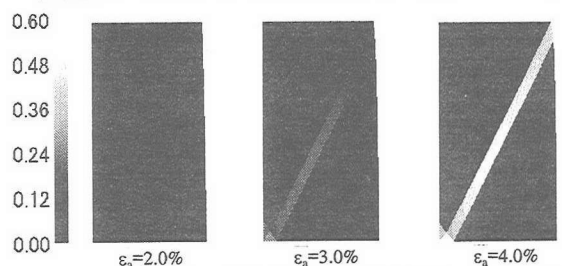


図-23 偏差ひずみ分布(非排水圧縮、OCR=10)

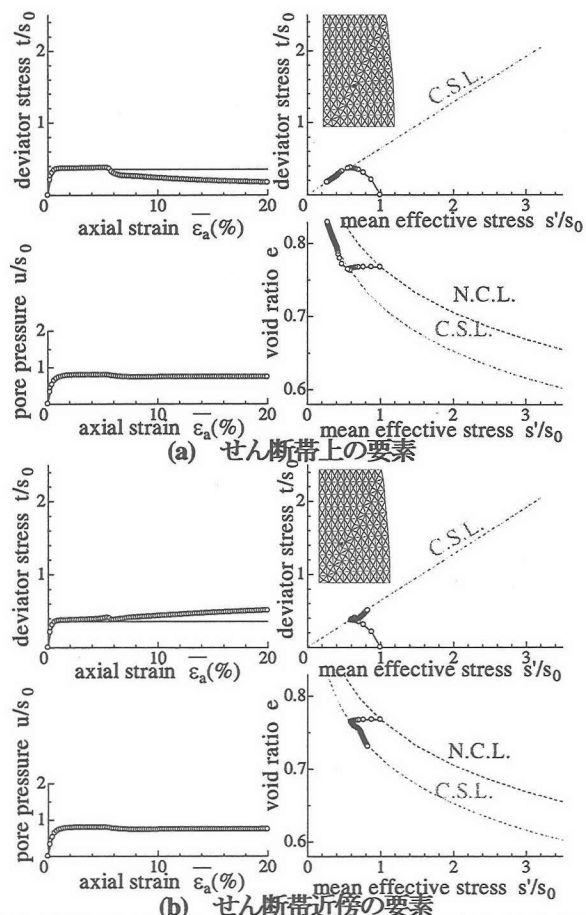
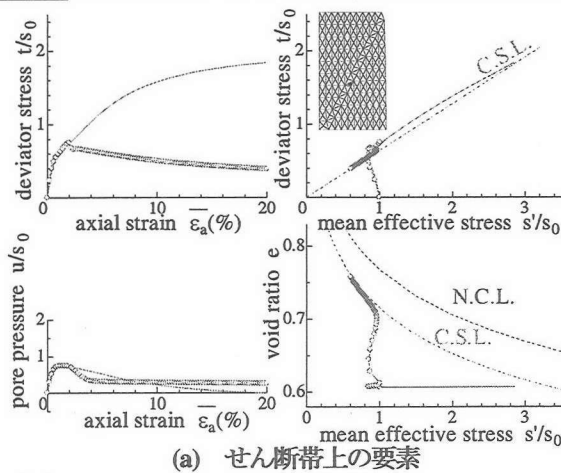
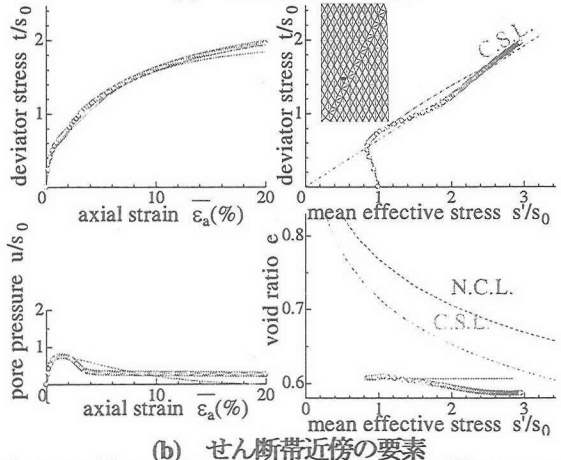


図-24 要素の応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=10)



(a) せん断帯上の要素



(b) せん断帯近傍の要素

図-25 要素の応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=10)

では、要素内の間隙水圧は一樣となる（有効数字で5桁は同一）十分遅い速度の非排水せん断である。図-20の正規圧密粘土では、若干のひずみ軟化を生じているが基本経路とマスとしての挙動はほぼ同じとなっている。しかし、図-21の過圧密粘土では、有効応力状態が限界状態に到達した後、限界状態を超えて塑性膨張を伴いなが

らも硬化してゆき、最終的に限界状態へ達するが、限界状態を越えた後の応力～ひずみ関係、強度、有効応力経路は理想体のそれとはおおきく異なる。図-22、図-23にせん断帯発生後の正規圧密粘土、過圧密粘土のそれぞれについての供試体内の偏差ひずみ分布を示す。排水条件下での圧縮試験と同様に、分岐の発生する前では、偏

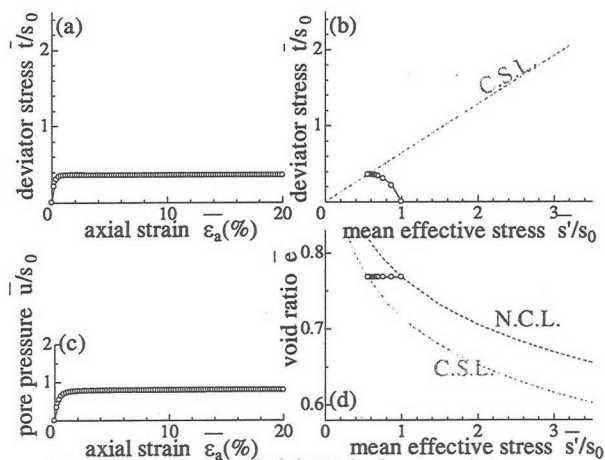


図-26 軸ひずみ速度無限大時のマスとしての
応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=1)

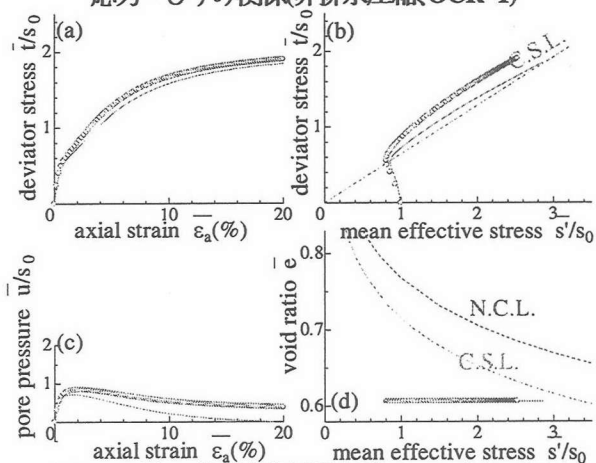


図-27 軸ひずみ速度無限大時のマスとしての
応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=10)

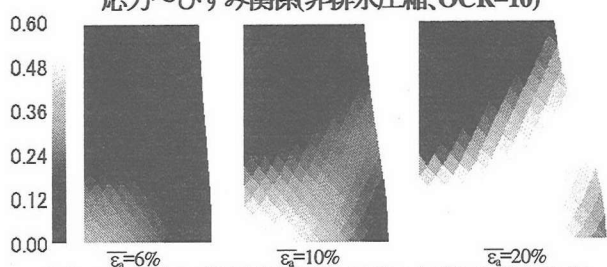


図-28 軸ひずみ速度無限大時の偏差ひずみ分布
(非排水圧縮、OCR=1)

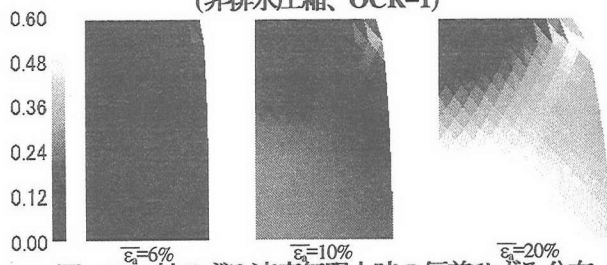


図-29 軸ひずみ速度無限大時の偏差ひずみ分布
(非排水圧縮、OCR=10)

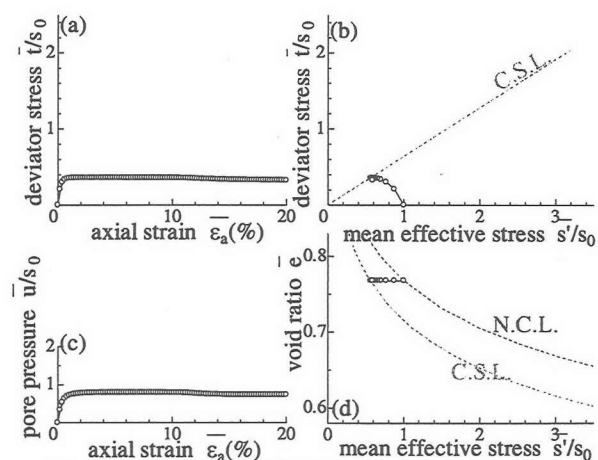


図-30 軸ひずみ速度1%/min時のマスとしての
応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=1)

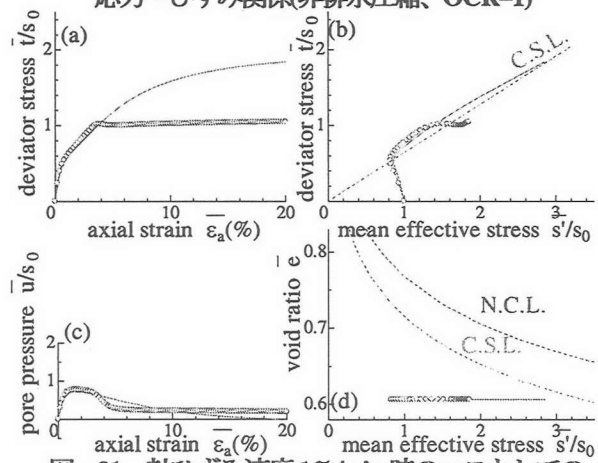


図-31 軸ひずみ速度1%/min時のマスとしての
応力～ひずみ関係(非排水圧縮、OCR=10)

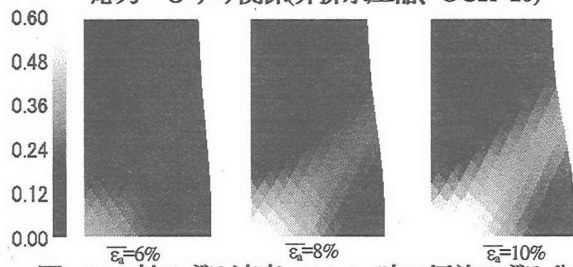


図-32 軸ひずみ速度1%/min時の偏差ひずみ分布
(非排水圧縮、OCR=1)

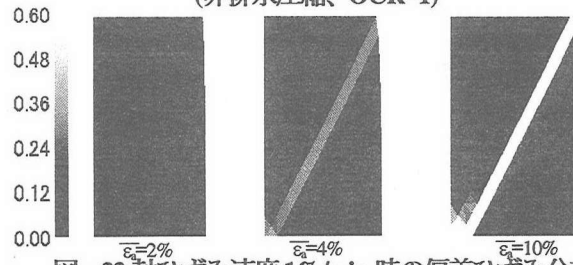


図-33 軸ひずみ速度1%/min時の偏差ひずみ分布
(非排水圧縮、OCR=10)

差ひずみの分布が供試体中心部で大きくなる傾向にある。そして、分岐が発生し軸ひずみが進むにつれて、偏差ひずみが供試体内で局所的に集中し、最終的にせん断帯が形成される。つまり、排水圧縮試験と同様せん断帯発生には、最初にひずみが卓越していた供試体の中心部の要素が trigger になる。

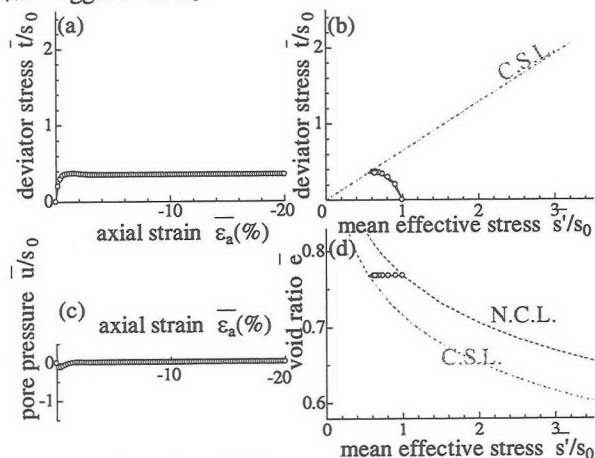


図-34 軸ひずみ速度 0.167%/day 時のマスとしての応力～ひずみ関係(非排水伸張、OCR=1)

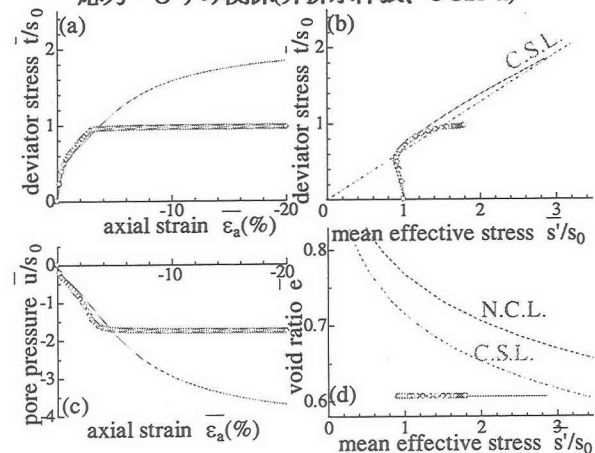


図-35 軸ひずみ速度 0.167%/day 時のマスとしての応力～ひずみ関係(非排水伸張、OCR=10)

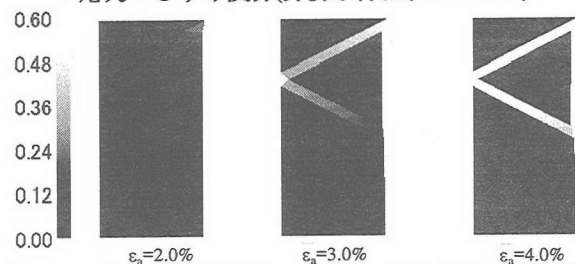


図-36 軸ひずみ速度 0.167%/day 時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=1)

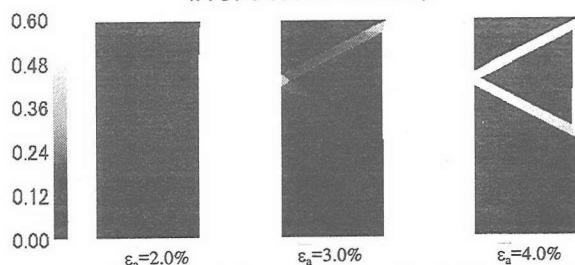


図-37 軸ひずみ速度 0.167%/day 時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=10)

図-24、図-25 に、排水条件と同様、正規圧密粘土、過圧密粘土のそれぞれの供試体について a)せん断帯上の要素、b)せん断帯近傍の要素の挙動を示す。せん断帯上の要素では、正規圧密粘土、過圧密粘土のいずれも軟化に到ると同時に急激な体積膨張を示す。正規圧密粘土では、マスとしての分岐経路に到るとほぼ同時にひずみ軟化

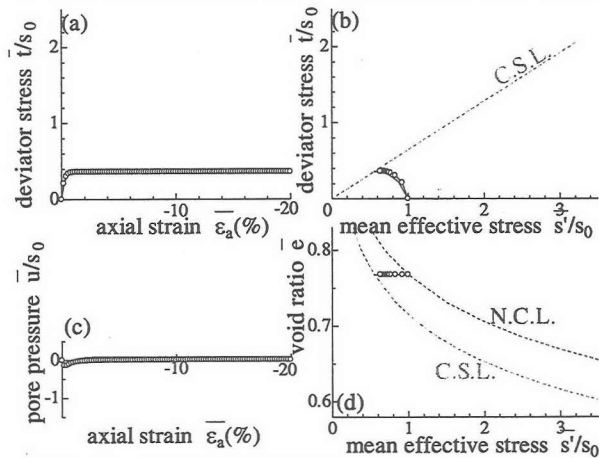


図-38 軸ひずみ速度無限大時のマスとしての応力～ひずみ関係(非排水伸張、OCR=1)

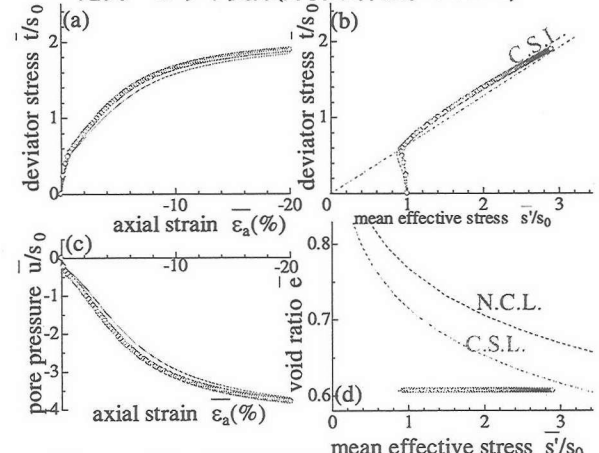


図-39 軸ひずみ速度無限大時のマスとしての応力～ひずみ関係(非排水伸張、OCR=10)

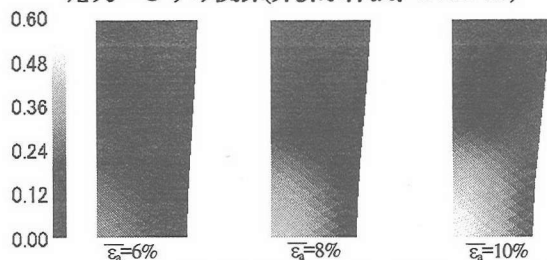


図-40 軸ひずみ速度無限大時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=1)

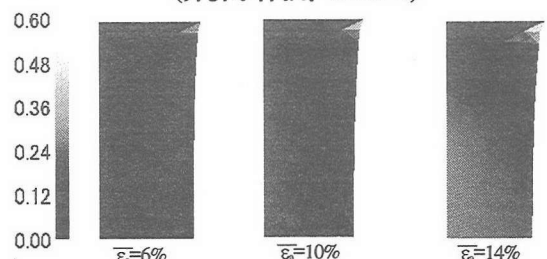


図-41 軸ひずみ速度無限大時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=10)

現象を示すが、過圧密粘土では、マスとしての分岐 ($\varepsilon_a=3\%$)よりも早く体積膨張を伴い軟化する。せん断帯近傍の要素では、正規圧密粘土では一度除荷されてその後再载荷される(硬化する)のに対して過圧密粘土では除荷されることなく硬化してゆく。せん断帯近傍要素の体積変化はいずれも一貫して圧縮している。そしてこれらの体積変化および軟化硬化の傾向は前節で述べた排水試験の場合と基本的に同じである。すなわち、排水せん断であれ非排水せん断であれ、供試体内で密度の不均一(せん断帯での間隙比の増加による軟化とその近傍での間隙比の減少による硬化)が生じ、それによりせん断帯ができるメカニズムは同じである。図-26、図-27はひずみ速度を無限大としたときの正規および過圧密粘土の非排水圧縮せん断試験の解析結果である(供試体内で間隙水の移動はなく各要素で非排水条件を満たす)。この時、過圧密粘土では理想体の関係からずれるものの、マスとしてのひずみ軟化は見られない。また、図-28、図-29の偏差ひずみ分布の解析結果からもわかるように、せん断帯は正規圧密、過圧密の両方で発生しない。また、図-30、図-31はひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a=1.0\%/min$ 時のマスとしての応力~ひずみ関係および間隙水圧の解析結果を示す。図-32、図-33はこの時の偏差ひずみの分布を示す。これらの図より、このひずみ速度では正規圧密粘土ではせん断帯はまだ見られないが、過圧密粘土では明確なせん断帯が発生し強度も理想体に比べかなり低くなることもわかる。以上の結果より、要素試験では端面の拘束により試験から得られる応力~ひずみ関係は理想体のそれとわずかに異なることもあるが、端面拘束そのものが応力~ひずみ関係におよぼす影響はそれほど大きくない。むしろ、端面の拘束を含めた境界条件の影響で供試体内の密度の不均一が生じ、それにより密度が小さくなったところでの強度の減少つまりひずみ軟化によりせん断帯が形成されるといえる。

5.2 非排水せん断試験

図-34 から図-45 に正規および過圧密粘土のひずみ速度を変えた非排水伸張試験の解析結果を示す。ここでも圧縮試験同様供試体内の間隙水の移動が全くない無限大のひずみ速度ではせん断帯は発生しないが、 $\dot{\varepsilon}_a=1\%/min$ や $\dot{\varepsilon}_a=0.167\%/day$ のひずみ速度ではせん断帯は形成され著しい強度低下が見られる。また、図-46 から図-49 に圧縮せん断および伸張せん断時の正規および過圧密土のマスとしての偏差応力~軸ひずみ関係を整理して示す。正規圧密粘土ではそれほど大きな差はないが、過圧密粘土では圧縮せん断、伸張せん断を通してマスとしての非排水強度(t/s_0)はひずみ速度が遅くなるに従い小さくなる。さて、このような非排水時のせん断強度特性は従来より典型的な粘土の時間効果特性として説明される事が多いが、弾塑性構成モデルを使った土~水連成有限変形解析によるシミュレーションも浅岡ら³⁾によって行われている。ここでは、より簡単な微小変形解析でも同様な結果が得られることを示した。

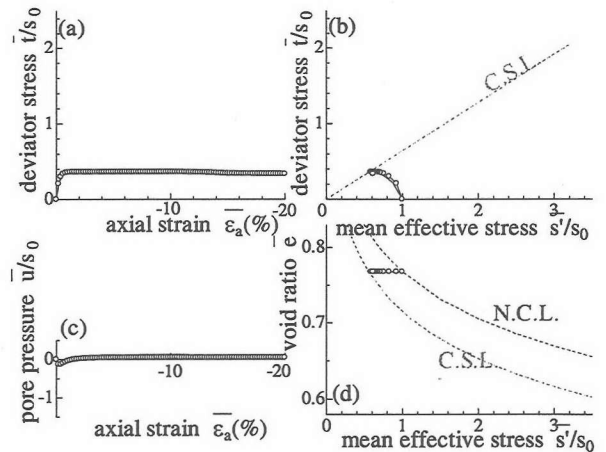


図-42 軸ひずみ速度 $1\%/min$ 時のマスとしての応力~ひずみ関係(非排水伸張、OCR=1)

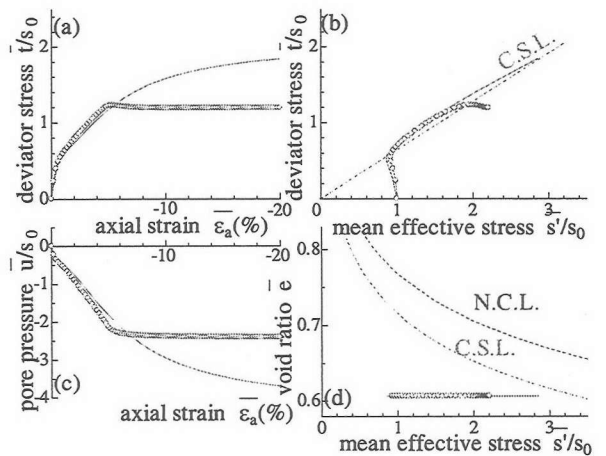


図-43 軸ひずみ速度 $1\%/min$ 時のマスとしての応力~ひずみ関係(非排水伸張、OCR=10)

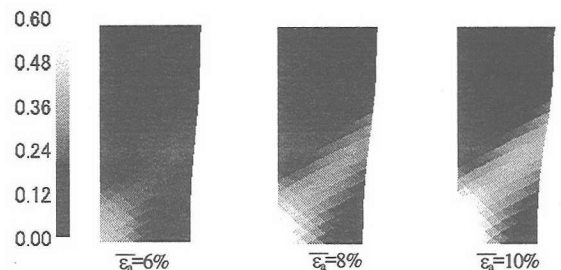


図-44 軸ひずみ速度 $1\%/min$ 時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=1)

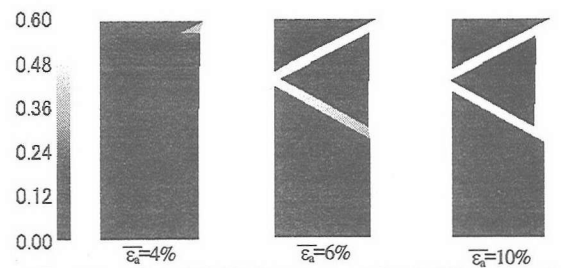


図-45 軸ひずみ速度 $1\%/min$ 時の偏差ひずみ分布(非排水伸張、OCR=10)

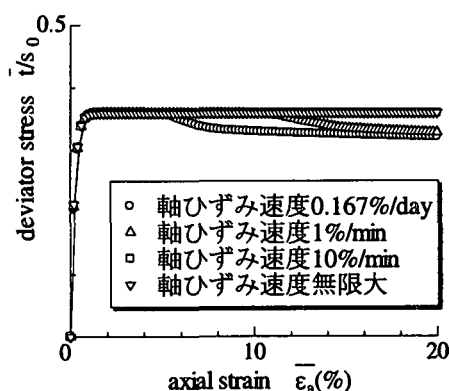


図-46 軸ひずみ速度の違いによる強度の変化
(非排水圧縮、OCR=1)

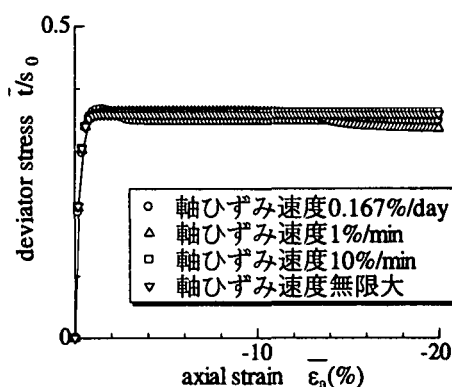


図-48 軸ひずみ速度の違いによる強度の変化
(非排水伸張、OCR=1)

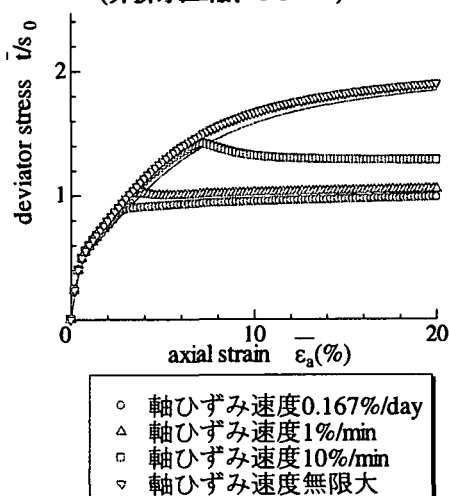


図-47 軸ひずみ速度の違いによる強度の変化
(非排水圧縮、OCR=10)

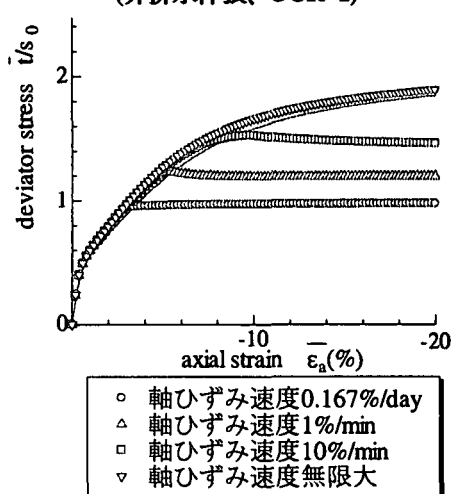


図-49 軸ひずみ速度の違いによる強度の変化
(非排水伸張、OCR=10)

6. 結論

平面ひずみ条件下の圧縮および伸張せん断試験の有限要素解析を行い、せん断試験時に見られるせん断帯の発生メカニズムやその時の供試体内の応力状態およびマスとして得られる応力～ひずみ関係の意味について解析的に検討した。通常、この手の解析は、土～水連成有限変形解析として取り扱われることが多く、また構成モデルも非共軸性や粘塑性を考慮した複雑なものが使われることがある。ここでは、等方硬化型の弾塑性モデル (subloading *tij*-model) を用いて、微小変形解析で2相系および1相系の解析を行った。解析モデルも①変形・強度特性におよぼす中間主応力の影響、②ひずみ増分方向の応力経路依存性、③変形・強度特性におよぼす密度・拘束応力の影響を適切に考慮できる簡単なモデルであるが、せん断帯の発生を含めよく知られている排水、非排水時の圧縮・伸張せん断試験を解析で再現できた。なお、ここでは供試体の1/4領域の微小変形解析を行ったのでひずみが大きくなったときは当然定量的な誤差は生じる。また、例えば非対称の分岐モードも表せないのは当然のことである。実際のせん断帯解析では上述したように材料特性の非線形性のほかに種々の要因を考慮して行われるのが常であるが、ここでは特に、材料の非線形性さえきちんと考えれば、せん断帯の発生メカニズムを再現できることを主張したい。

参考文献

- 1) Yatomi, C., Yashima, A., Ezuka, A. & Sano, I. (1989) : General theory of shear bands formulation by a non-coaxial Cam-clay mode, *Soils & Foundations*, 29(3), 41-53.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. & Noda, T. (1997) : Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils & Foundations*, 37(1), 13-28.
- 3) Asaoka, A. & Noda, T. (1995) : Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundary, *Soils & Foundations*, 35(1), 83-100.
- 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), 523-545.
- 5) 梶尾正也・中井照夫・星川拓哉・吉田英生(2000) : 3次元応力経路下において単調および繰返し載荷を受ける砂の応力・ひずみ挙動とそのモデル化, *地盤工学会論文報告集*, 41(3), 125-140.
- 6) 中井照夫・梶尾正也・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

(2002年4月19日 受付)