

間隙水圧増加試験における過圧密粘土の変形挙動

Deformation Behavior of Overconsolidated Clay in Pore Pressure Loading Test

北海道大学大学院 フェロー 三田地 利之 (Toshiyuki Mitachi)
 北海道大学大学院 ○学生員 高橋 秀彰 (Hideaki Takahashi)
 北海道大学大学院 正会員 工藤 豊 (Yutaka Kudoh)

1. はじめに

一般に、地すべりや斜面崩壊は、すべり面に作用する間隙水圧の上昇による有効応力の減少に起因する場合が多いと考えられている。このような現象を解明するために、斜面の応力状態を再現した粘性土供試体に対して間隙水圧を強制的に増加させる試験を行う必要がある。本研究では、間隙水圧の载荷を一定速度で制御可能な三軸試験装置を用い、間隙水圧増加試験を行うことにより、その解明を試みた。

また、実際の斜面は過圧密履歴を受けていることが多く、より自然地盤に近い応力状態を再現するという意味で、 K_0 状態に近い応力状態で過圧密履歴を与えた供試体に対し間隙水圧を载荷する試験を行うことにより、間隙水圧増加試験における圧密履歴の影響について検討した。

2. 試験条件

試料は市販の NSF-clay($\rho_s=2.77$, $LL=56$, $PL=28$)で、粉末状の試料に含水比が液性限界の2倍程度になるように蒸留水を加え攪拌し、鉛直応力 150 kPa で 10 日間一次元圧密し、直径 50mm、高さ 100mm に成形したものを用いた。

試験は NSF-clay の K_0 値(0.54)で異方圧密したのち、間隙水圧の载荷を行った。過圧密履歴を与えた試験では、平均有効主応力 $p'=300$ kPa、 K 値=0.54 で異方圧密したのち、 K 値一定のまま所定の応力点まで除荷した。なお、圧密は全ての試験において周面ろ紙を使用せず、供試体上下からの両面排水条件で行い、3t 法により打ち切りとした。間隙水圧は、背圧ルートから二重管ピュレットを介して供試体上部に载荷し、その測定は供試体底部中央で行った。また、間隙水圧载荷過程では、コンピュータ制御のもと拘束圧、軸差応力一定の条件下で間隙水圧を一定の速度で载荷した。

表 1 に試験条件を示す。No.1～5 は水圧载荷速度を変化させた間隙水圧増加試験で、No.6～8 は過圧密履歴を与えたのち、間隙水圧の载荷を行った試験、No.9 は先行圧密圧力での間隙水圧増加試験、No.10 は No.6 と同じ応力点まで正規圧密後間隙水圧を载荷した。なお、排水クリープによる影響を小さくするため、No.6 と No.10 のトータルの圧密時間を統一するため、No.6 の圧密速度を 0.22(kPa/min)とした。

3. 試験結果

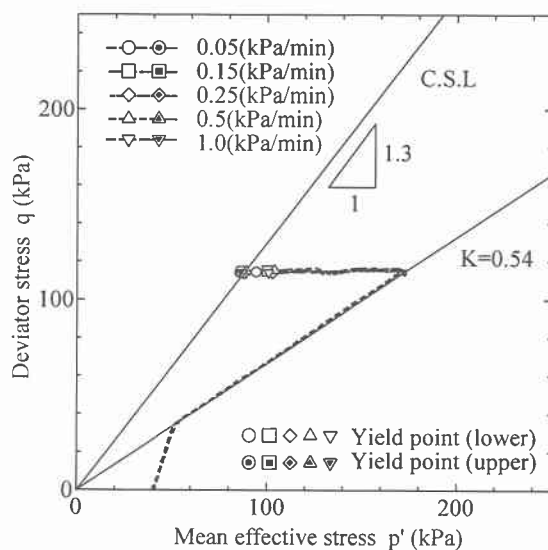
3.1 水圧载荷速度の影響

図 1 に No.1～5 の応力経路を示す。図中の C.S.L は圧密非排水三軸試験結果によるものである。間隙水圧増加

表 1 試験条件

供試体 番号	OCR	圧密圧力 p' (kPa)	圧密速度 (kPa/min)	圧密時間 (min)	水圧 载荷速度 (kPa/min)
No.1	1	172	0.5	1382	0.05
No.2	1	172	0.5	1389	0.15
No.3	1	172	0.5	1352	0.25
No.4	1	172	0.5	1370	0.50
No.5	1	172	0.5	1372	1.00
No.6	1.75	171.4(300)	-1.0(0.5)	594(2561)	0.1
No.7	4	75(300)	-1.0(0.5)	1025(2570)	0.1
No.8	8	37.5(300)	-1.0(0.5)	1187(2575)	0.1
No.9	1	300	0.5	2584	0.1
No.10	1	171.4	0.22	3105	0.1

※No.6～8 における()内の値は先行圧密過程での値。

図 1 $p' \sim q$ 関係

過程では、間隙水圧の増加量が p' の減少量に相当し、軸差応力 q 一定のもと p' が減少するため、応力点は圧密終了時の $K=0.54$ の点から図中の左方向に水平に移動し、徐々に過圧密化する。その過程で供試体は吸水膨張により徐々に軟化し、破壊に至る。

破壊に至るまでの変形挙動について以下に記す。図 2 に軸ひずみ(ϵ_a)～側方ひずみ(ϵ_r)関係を示す。なお、 ϵ_r は ϵ_a と ϵ_v から計算した。全ての試験において、同じ勾配の直線となり水圧载荷速度の違いによる差は見られない。また、図 3 のせん断ひずみ(ϵ_s)～体積ひずみ(ϵ_v)関係にお

いても発生ひずみ量に多少の差はあるものの、水圧荷重速度との関連性は見られなかった。したがって、最終変形状態は水圧荷重速度によらないと考えられる。

降伏点について以下に記す。間隙水圧増加過程初期において粘土供試体は間隙水圧の増加に伴い $e \sim \log p'$ 曲線の膨潤線に沿って弾性的に吸水膨張するが、C.S.L. に近づくにつれて塑性変形が生じ、しだいに破壊面が形成される。破壊面が形成され始める点においては正のダイレイタンスにより p' の減少が少なくなり、破壊面の形成に伴いせん断ひずみ速度が発生すると考え、この点を本論文では降伏点とした。また、破壊面の形成が終了した点においては、せん断ひずみに対して、せん断ひずみ速度が急増すると考え、この点を上降伏点とした。¹⁾

上述の方法により、図 4 の平均有効主応力(p')～せん断ひずみ速度($d\epsilon_s/dt$)関係から降伏点を、図 5 のせん断ひずみ(ϵ_s)～せん断ひずみ速度($d\epsilon_s/dt$)関係から上降伏点を決定した。図 4 によると降伏点における p' は水圧荷重速度が遅くなるにつれ小さくなる傾向があり、ひずみ速度が急増する上降伏点までの p' の変化量も小さい。図 5 によると上降伏点におけるせん断ひずみは水圧荷重速度が遅くなるにつれ大きくなる傾向があり、同一のせん断ひずみにおけるせん断ひずみ速度は小さくなっている。このことから水圧荷重速度が速いほど、破壊の始まる平均有効主応力は大きく、破壊も急速に起こっていることが分かる。また、ひずみ速度が変化しながら破壊に至る進行性破壊現象²⁾³⁾は見られなかった。水圧荷重速度 1.0(kPa/min)の場合において上述の傾向を示さないのは水圧荷重速度が速すぎたため、破壊に至るまでの間隙水圧やひずみの分布が様ではない恐れがあり、それらを正しく評価できなかったためと考えられる。

図 6 にせん断ひずみ(ϵ_s)～正規化したひずみエネルギー($W_p = \int d\epsilon_v + \eta \int d\epsilon_s$)の関係を示す($\eta = q/p$)。すべての試験において同じ直線となり、ひずみエネルギーはせん断ひずみ量に依存し⁴⁾、水圧荷重速度の影響を受けないと考えられる。また、この図における降伏点から上降伏点までの間が、破壊面の形成に必要なひずみエネルギーとなり、水圧荷重速度が速いほどそのエネルギーは小さくなり、このことから水圧荷重速度が速いほど破壊が急速に起こっていることが分かる。しかし、水圧荷重速度 1.0(kPa/min)では、上述のように異なる傾向が見られた。

3.2 圧密履歴の影響

図 7 に No.6～10 の応力経路を示す。図中の降伏点は 3.1 と同様の方法で決定した。図 8 のせん断ひずみ(ϵ_s)～応力比(η)関係によっても示されるように、正規圧密の供試体は限界状態の応力比($M=1.3$)よりも小さい応力比で降伏点が現れ、限界状態線上に上降伏点が現れるのに対して、過圧密の供試体では限界状態線を越えた点に降伏点が現れ、その後応力比は減少し限界状態線上に上降伏点が現れる。過圧密の供試体においてこのように一度限界状態線を越えたのち限界状態線に収束するという挙動は、過圧密比の大きい過圧密粘土の非排水せん断試験の破壊挙動と類似している。しかし、本試験において

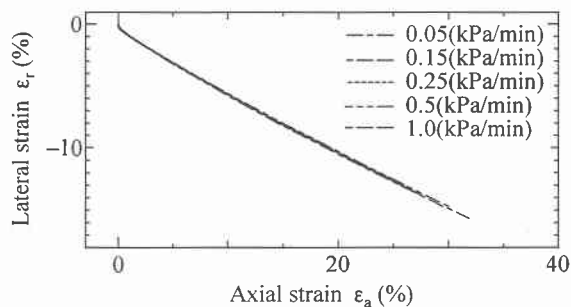


図 2 $\epsilon_a \sim \epsilon_r$ 関係

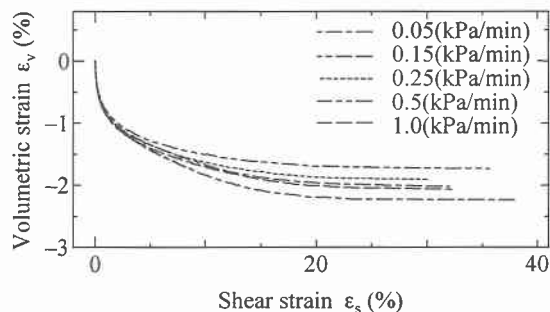


図 3 $\epsilon_s \sim \epsilon_v$ 関係

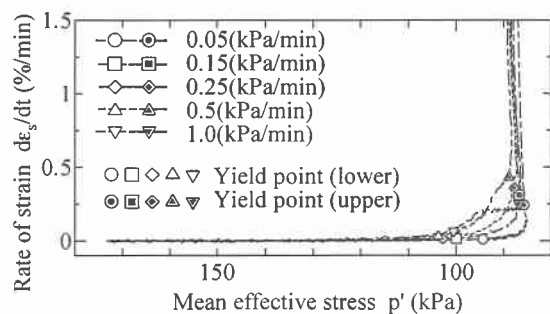


図 4 $p' \sim d\epsilon_s/dt$ 関係

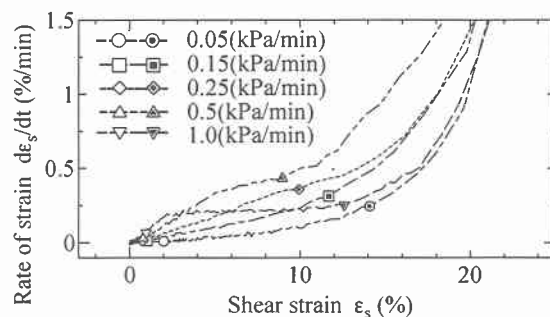


図 5 $\epsilon_s \sim d\epsilon_s/dt$ 関係

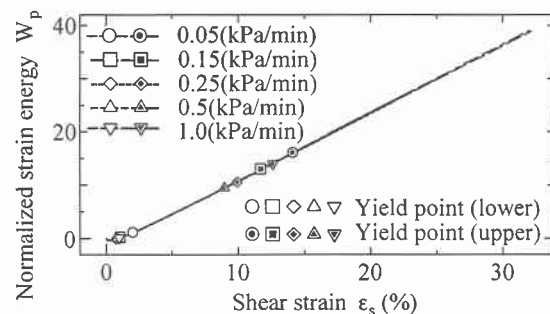


図 6 $\epsilon_s \sim W_p$ 関係

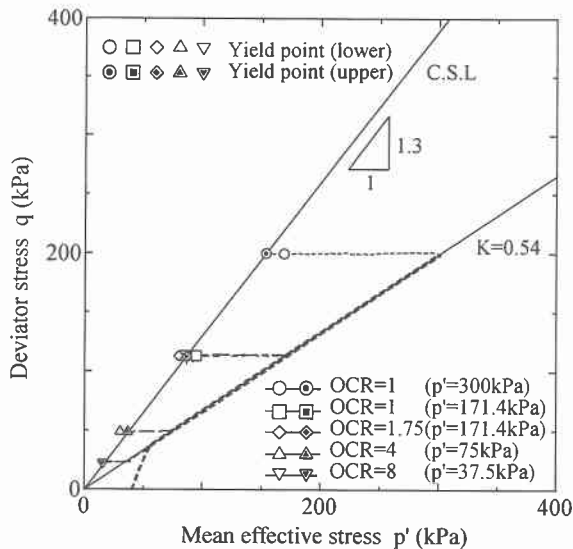


図7 $p' \sim q$ 関係

は過圧密比の比較的小さい $OCR=1.75$ の試験においても同様の挙動が見られ、 $OCR=4$ または 8 の試験における η の最大値もかなり大きくなっている。過圧密の供試体は正のダイレイタンス傾向を示すことから塑性ひずみが発生する下降伏点以降で、正規圧密の供試体よりも吸水膨張する傾向が強いと考えられる。図9の $e \sim \log p'$ 関係を見ると、過圧密比に関わらず全ての試験において間隙水圧増加初期は膨潤線に沿って弾性的に膨張するが、塑性変形を生じ破壊面が形成される上下降伏点間の間隙比の変化量すなわち吸水量は過圧密比とともに大きくなっている。この傾向は図10のせん断ひずみ(ϵ_s)～体積ひずみ(ϵ_v)関係によっても示されている。また、正規圧密や過圧密比が小さい場合は上降伏点以後は体積ひずみが一定値に落ち着くのに対して、過圧密比の大きい供試体では上降伏点以後も体積ひずみは減少(膨張)し続けている。

試験終了時の供試体の破壊状態について以下に記す。 $OCR=1$ では供試体中央部に変形が集中したのに対して、 $OCR=4, 8$ では明らかに供試体上部に変形が集中した。上述のように $OCR=4, 8$ では上降伏点以後も破壊面付近では吸水挙動が続くため、破壊面より下部には間隙水圧は伝達されず供試体上部のみが軟化し、供試体上部のみに変形が集中したと考えられる。また、この場合供試体底部で計測する間隙水圧は、破壊面での間隙水圧を評価できず、実際の破壊面における間隙水圧はさらに大きいと予測される。したがって、図8における $OCR=4, 8$ の η の最大値はさらに大きい可能性がある。また、図において $OCR=8$ よりも $OCR=4$ の η の最大値のほうが大きくなっているが、 $OCR=8$ のほうが吸水性が大きいので破壊面での応力比は $OCR=8$ のほうが大きくなっている可能性がある。

図11に軸ひずみ(ϵ_a)～側方ひずみ(ϵ_r)関係を示す。正規圧密の供試体においては両者には線形性があり、圧密圧力によらず勾配は等しい。一方、過圧密の供試体では、ひずみの発生初期段階において過圧密粘土の吸水性の影響が大きく、軸ひずみに対して側方ひずみの発生量が大きいと線形関係にはならないが、上降伏点を越えた後は両者は直線関係となり、その勾配は正規圧密のものと

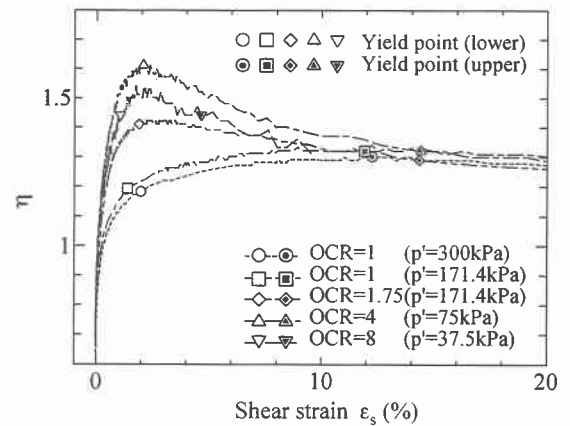


図8 $\epsilon_s \sim \eta$ 関係

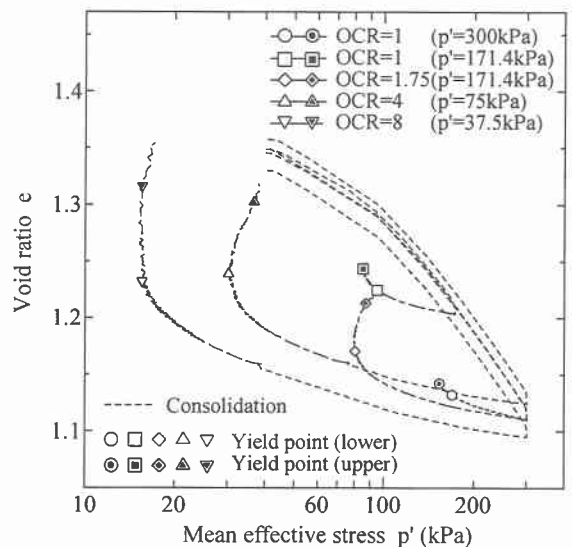


図9 $e \sim \log p'$ 関係

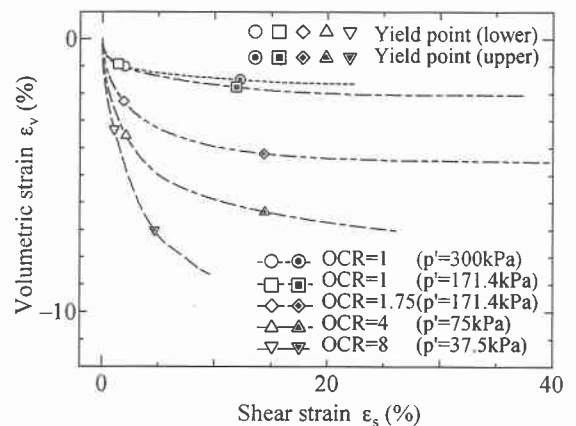


図10 $\epsilon_s \sim \epsilon_v$ 関係

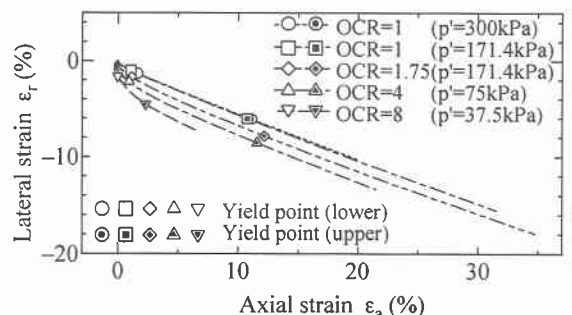


図11 $\epsilon_a \sim \epsilon_r$ 関係

等しい。したがって、上降伏点以後の変形挙動は圧密履歴の影響を受けないと考えられる。

過圧密供試体の降伏挙動について以下に記す。図 12 に平均有効主応力(p')～せん断ひずみ速度($d\epsilon_s/dt$)関係を示す。正規圧密の供試体では下降伏点からひずみ速度は徐々に増加し上降伏点に至るが、過圧密の供試体では p' の最小値付近まで下降伏点は現れず、その後ひずみ速度は急激に増加する。しかし、上述のように過圧密比の大きな供試体では下降伏点以降の破壊面付近の間隙水圧を正確に測定できていない可能性があるため、実際は正規圧密と同じように下降伏点以降さらに p' が下がっている可能性がある。

図 13 にせん断ひずみ(ϵ_s)～せん断ひずみ速度($d\epsilon_s/dt$)関係を示す。正規圧密の供試体に比べ、過圧密の供試体はせん断ひずみに対するせん断ひずみ速度の変化が小さいように思われるが、ひずみは均一な変形を仮定して算出しているため、変形が局所化した過圧密の供試体では破壊面付近のひずみ速度を過小評価していると考えられる。破壊の局所化が著しい過圧密供試体の降伏挙動を正確に把握するためには、破壊面付近の間隙水圧およびひずみ速度の評価方法をさらに検討する必要がある。

図 14 にせん断ひずみ(ϵ_s)～正規化したひずみエネルギー(W_p)の関係を示す。軸ひずみ(ϵ_a)～側方ひずみ(ϵ_r)関係と同様に正規圧密の供試体においては圧密圧力によらず同じ勾配の直線となり、過圧密の供試体では上降伏点後の $\epsilon_s \sim W_p$ は直線関係となり、その勾配は正規圧密のものと同しくなる。

4. 結論

- 1) 間隙水圧増加過程における $\epsilon_a \sim \epsilon_r$ 関係、 $\epsilon_s \sim \epsilon_v$ 関係は、間隙水圧の載荷速度の影響を受けない。
- 2) 間隙水圧の載荷速度が速いほど、破壊面の形成が始まる p' は大きくなり、破壊は急速に起こる
- 3) 正規化したひずみエネルギーは水圧載荷速度によらず同一勾配の直線となり、せん断ひずみ量に依存する。
- 4) 正規圧密の供試体は限界状態の応力比($M=1.3$)よりも小さい応力比で下降伏点が現れ、限界状態線上に上降伏点が現れるのに対して、過圧密の供試体では限界状態線を越えた点に下降伏点が現れ、その後応力比は減少し限界状態線上に上降伏点が現れる。
- 5) 間隙水圧増加過程において、過圧密の供試体は変形の局所化が著しく、供試体は要素性を失う。
- 6) 間隙水圧増加過程における最終変形形態は、圧密履歴により変化する。

参考文献

- 1) 高畑勝行ら：間隙水圧増加試験による地滑り粘土の変形機構について、平成 12 年度地すべり学会北海道支部研究発表会予稿集、pp.17-20, 2000. 2) 大塚悟ら：間隙水圧増加試験による地すべり機構の一考察、第 37 回地すべり学会研究発表講演集、pp.357-360, 1998. 3) 岩部司ら：間隙水圧の上昇作用を受ける力オリン粘土のせん断特性、同上、pp.361-364, 1998. 4) 片桐雅明：飽和粘性土の有効応力減少過程における変形特性、横浜国立大学学位論文。

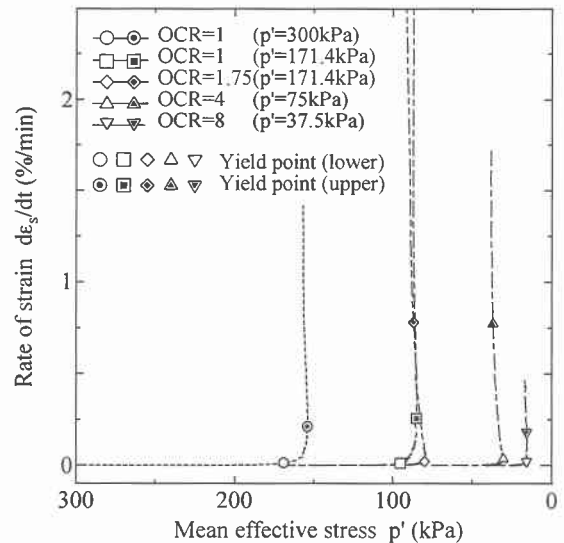


図 12 $p' \sim d\epsilon_s/dt$ 関係

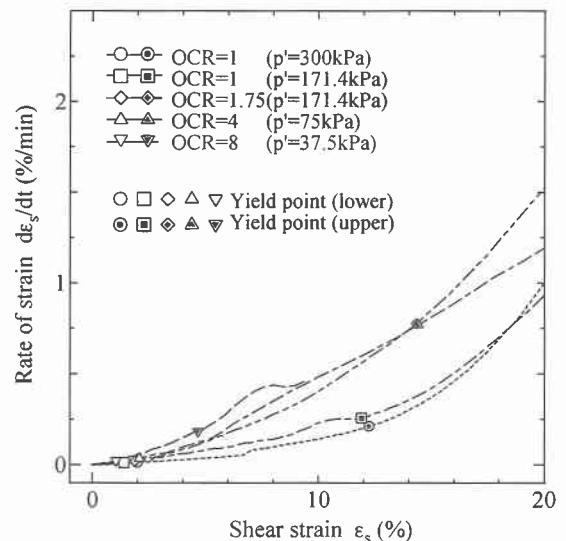


図 13 $\epsilon_s \sim d\epsilon_s/dt$ 関係

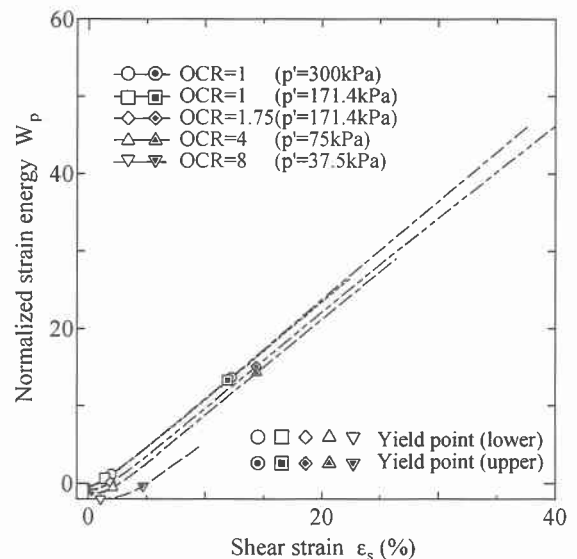


図 14 $\epsilon_s \sim W_p$ 関係