

# リングせん断試験機を用いた地すべり粘土の応力制御試験

防災設計工学研究室 尾山 康弘  
指導教官 大塚 悟

## 1. はじめに

地すべりは降雨や融雪による地下水位が上昇する時期に多く発生することから、間隙水圧の増加に伴い有効応力が減少し、せん断抵抗力が減少することにより発生すると考えられる。しかし、地すべりのメカニズムを解明するために従来行われているリングせん断試験は変位を強制的に与える方式であるため、実際の斜面の応力変化による応答と異なっている。

本研究ではリングせん断試験機を用い、せん断応力を一定に制御する条件にて間隙水圧の増加を模擬した有効垂直応力の減少試験(応力制御)を行った。

試験に当たっては、事前に変形を与えないもの(初生すべり型地すべりに相当)と大変形を与えたもの(再すべり型地すべりに相当)を用いて両者の強度特性を検討する。

## 2. 試料および試験方法

試料には沖見地すべり地より採取した粘土を用いた。物性を表 1 に示す。試料は液性限界の 2 倍の含水比で十分に練り混ぜ、予備圧密容器で 24 時間予圧密した後、外径 10cm、内径 6cm、高さ 2cm の中空円筒形に成型した。

表 1 沖見粘土の物性値

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.68
液性限界 $w_L$ (%)	101
塑性限界 $p_L$ (%)	29
塑性指数 $I_p$	72
粘土分含有率(<2 $\mu$ m) CF(%)	55

試験の初期状態にはせん断履歴の有無によって 2 通り用意した。初生すべり型試験においては試験機にて圧密した試料に所定のせん断応力を載荷した状態を初期状態とする。一方、再すべり型試験では圧密後、排水条件下でせん断を行って試料を完全に残留状態にした後に再圧密を行い、所定のせん断応力を載荷した状態を初期状態とした。

リングせん断試験機においては試験機の機構上排水条件を制御することは難しい。そこで、本研究では初期状態の供試体から、垂直応力を緩速で減少させることによって間隙水圧増加と等価な有効応力変化を再現する方法(完全排水条件)を用いた。垂直応力の減少速度は事前に検討試験を行い、排水条件を満足する

ように 0.1kPa/min とした。

## 3. 試験結果

### 3.1 初生すべり型試験

初生すべり型試験において、せん断応力レベルを変化させた変形挙動と応力経路を図 1 に示す。応力経路上にはひずみ制御試験より得た排水強度線も示す。また、本試験ではせん断変位速度が急増する点を降伏点、せん断応力を一定に保てなくなる点を破壊点と定義しており、2 つのしきい値も重ねて示す。なお、有効垂直応力の減少開始時のせん断変位をゼロとした。

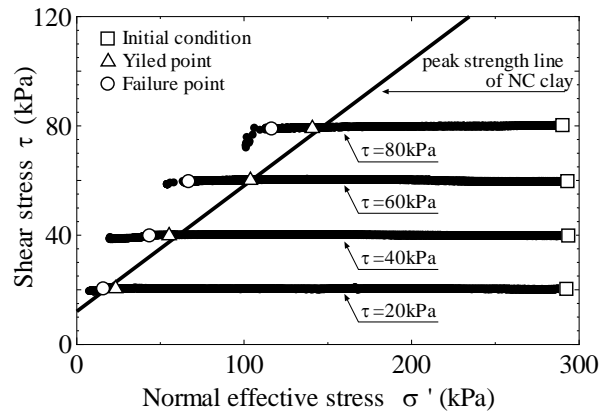
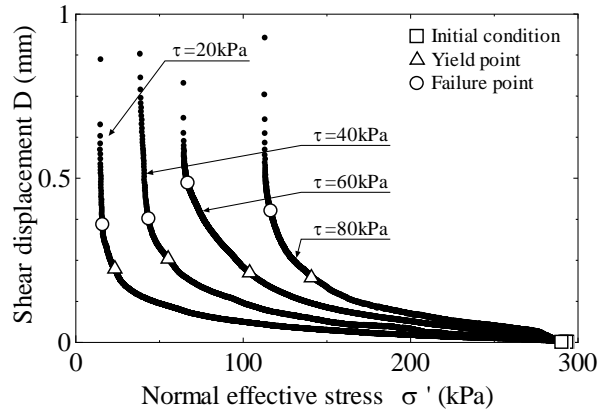


図 1 せん断履歴の無い粘土のせん断挙動

供試体は有効垂直応力を減少させる過程で過圧密な状態に移行するため、せん断に伴うダイレイタンスが生じ吸水膨張する。体積膨張が生じると供試体は密な状態から緩い状態になるため、せん断抵抗力が低下して変形が増大する。変形挙動をみると、有効垂直応力の減少に伴って各ケースとも初期に弾性的な変形を生じている。初期状態にて与えるせん断応力が大きいほどわずかな有効垂直応力の減少で変形しているが、

せん断変位速度の急増点である降伏点に達するまでの変位量はほぼ等しい結果となった。この時の応力経路を見ると降伏点は排水強度線(せん断抵抗角)上に位置している。これは、三軸試験機を用いた間隙水圧載荷試験において、降伏点が限界状態線上に位置する結果と一致する。この結果は正規圧密粘土の排水強度が垂直応力減少試験の降伏点、すなわち変位急増のしきい値を表すこととなり興味深い。一方、破壊点は排水強度線よりも左側に位置した。破壊後のせん断応力変化には緩やかなケースと急激なケースがあったが、どのような条件で変化に差が生じるのか傾向はみられなかった。破壊点に達すると変形はさらに急激に進行して完全に破壊した。

### 3.2 再すべり型試験

次に、再すべり型試験の応力経路及び変形経路を図2に示す。供試体には事前に十分なせん断変形を与えて残留状態にしているため、せん断面は鏡肌を形成しており、初生すべり型試験とは異なる強度特性を示す。

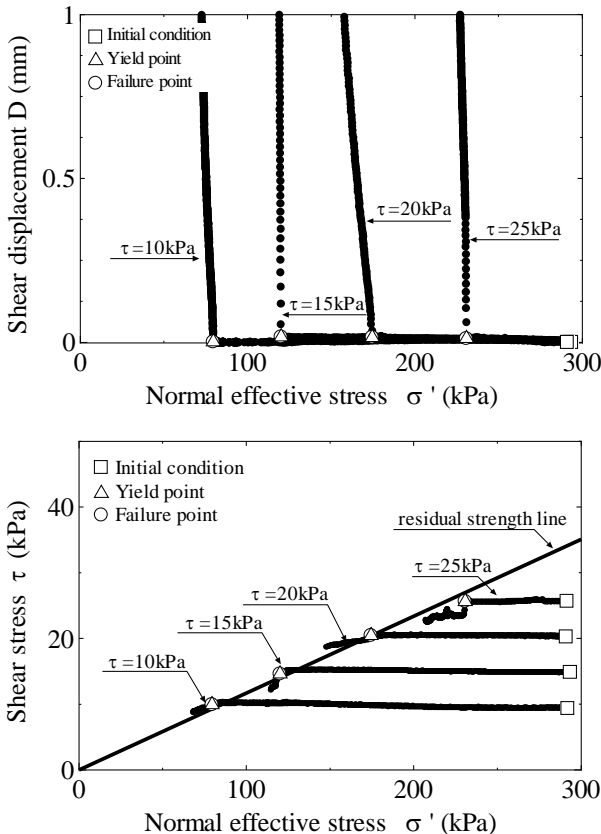


図2 せん断履歴を与えた粘土のせん断挙動

せん断面を形成した場合はせん断面が無い場合と異なり脆性的な破壊挙動を示した。図では有効垂直応力を減少させてもほとんど変形せず、ある応力値で急

激に破壊を起こしている。そのため、せん断面が無い場合は降伏点と破壊点を区別できたのに対して、せん断面がある場合は降伏点と破壊点はほぼ同じ点に得られ区別することができない。破壊応力値は完全軟化強度よりもずいぶん小さい結果となり、残留強度線上に位置した。せん断面を与えた場合においても供試体は有効垂直応力の減少によって吸水膨張を起こすと考えられるが、降伏点に至るまでせん断変位は生じていない。以上から、再すべり型地すべりのようにせん断面が形成された場合に発揮させるせん断強度は供試体全体ではなく、すべり面の接触条件が支配的である。

### 3.3 せん断履歴の有無による強度の違い

図3は初期状態を正規圧密とした試験のしきい値を応力比で整理したものである。低垂直応力下において完全軟化強度が曲線となっているのは粘着力による影響である。

図のように初生すべり型および再すべり型ともに、降伏点はひずみ制御試験による排水強度線上に位置している。これは安定解析に用いる強度パラメータ(完全軟化強度、残留強度)が垂直応力減少試験における降伏点に対応し、排水強度は応力制御試験において変位速度の急増点であることを示している。一方、破壊点はパラツキがあるが完全軟化強度線に対して上方に位置し平行関係にあるようにみえる。

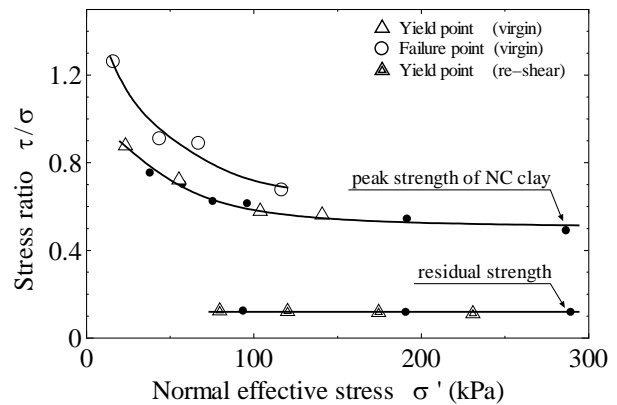


図3 せん断履歴の有無による強度の違い

### 3.4 応力履歴を与えた初生すべり型試験

初生すべり型地すべり斜面を対象に、作用させるせん断応力を等しくして初期状態の過圧密比を変化させる垂直応力減少試験を行った。図4に各過圧密比における変形挙動を示す。

初期状態から有効垂直応力を減少させていくと供試体には弾性変形が生じて降伏点に至る。このとき降伏点は、応力履歴を与えない場合と同様に完全軟化強度線上に位置した。つまり、せん断面が無い場合、過

圧密比に依らず塑性変形が生じるまでの変位量はほぼ一定で、また塑性変形が生じ始める有効垂直応力も変わらないことが分かった。しかし、降伏点を過ぎると過圧密比の影響が現われてくる。破壊に至るまでの変位量は変わらないが、過圧密比が大きいほどピーク強度は大きく、小さな有効垂直応力で破壊に至っている。これは初期間隙比が小さい供試体の方がより大きな間隙水圧の上昇に耐えられることを表す。

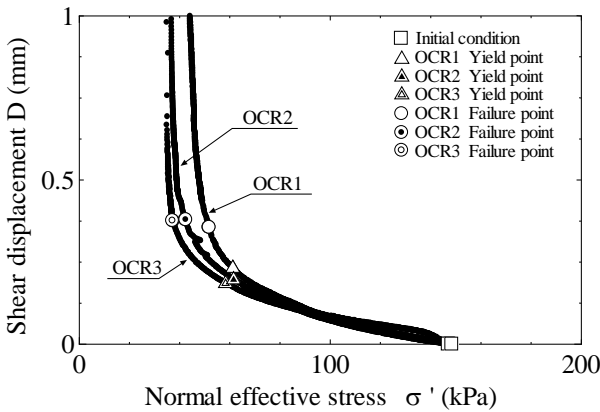


図4 応力履歴を与えた初生すべり型試験

図5は初期過圧密比と各しきい値の関係をプロットしたものである。これより降伏点は過圧密比に依らず一定であり、破壊点は過圧密比が大きいほど高い強度を示すことが確認できる。応力履歴(圧密)を与えたことによる供試体全体あるいはせん断面付近の間隙比変化がせん断強度に影響を及ぼすことが分かった。

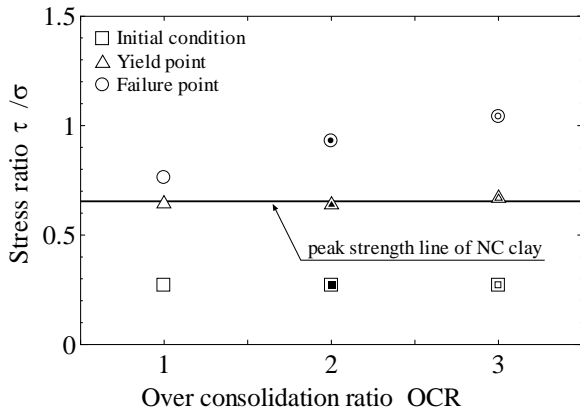


図5 初期過圧密比によるしきい値の違い

### 3.5 再圧密効果の検討

再すべり型地すべりは、間隙水圧の載荷・除荷による滑動を繰り返す。せん断破壊した後、間隙水圧の除荷に伴ってすべり面の粘土が再圧密すると、次のせん断に対してせん断強度が回復すると考えられる。このような再圧密効果が発揮されれば再滑動時のせん断強度は単純に残留強度によって表現できない。そこで再

圧密効果を対象に垂直応力減少試験を行った。

また、上記の再圧密を考慮した垂直応力減少試験に対応したひずみ制御試験を行い、再圧密効果を検討した。

#### 3.5.1 再圧密を考慮した垂直応力減少試験

図6は残留状態到達後の再圧密時に垂直応力の載荷・除荷による応力履歴を与え、初期状態を異なる過圧密比に設定した試験結果である。過圧密比1の場合は応力履歴を与えていないケースであり、有効垂直応力を減少させてもほとんど変位を生じずに降伏点にて急激な破壊をおこす。このとき降伏点は応力経路図において残留強度線上に位置している。一方、過圧密比を大きくするとマクロ的な挙動に変化はみられないが、破壊強度は増加する傾向がみられた。

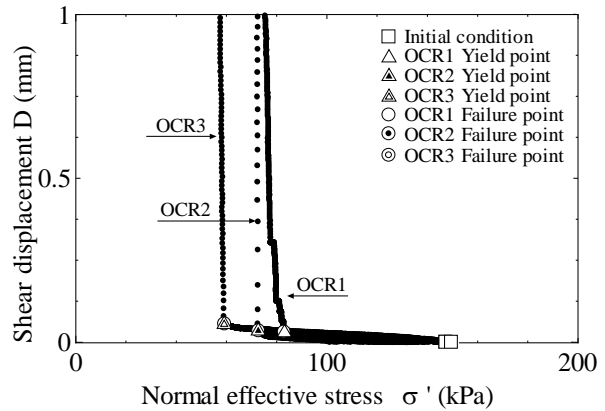


図6 応力履歴を与えた再すべり型試験

大変形を与えた場合に発揮されるすべり面のせん断強度は残留せん断強度であることから、せん断面における摩擦によると考えられる。十分に鏡肌が形成されたすべり面は摩擦力のみが作用すると仮定すると、残留状態にて圧密の応力履歴を加えても摩擦力は変化しないために再せん断時の残留強度は変わらないと考えられる。しかし、実験では降伏点・破壊点には明確な再圧密効果がみられ、大変形を与えたすべり面においても圧密履歴によって粘着力が作用することが明らかになった。

#### 3.5.2 再圧密を考慮したひずみ制御試験

試験方法については、せん断面をつくり圧密履歴を与えるまでは上記の垂直応力減少試験と同じである。再圧密時の過圧密比を変化させ、再圧密後に再度ひずみ制御試験を行って、どの程度せん断強度が回復するのか調べた。

図7は再圧密時の過圧密比を変化させた応力比-せん断変位関係である。図の中央の途切れた部分は

大変位を与えたことを表している。せん断を開始すると数 mm の変位でピークに達し、徐々に軟化して残留状態に至る。過圧密比 1 における再圧密後の挙動をみると、再せん断と共に強度が回復して残留強度まで達し、それ以後の強度変化はみられなかった。一方、再圧密時に過圧密比 2 になるよう応力履歴を与えた場合は異なる挙動を示した。残留強度まで回復した後、さらに強度が増加して瞬間的なピーク強度を示した。その後、残留強度よりもわずかに高い強度まで急落し、さらに 10mm 程度のせん断変位を与えると残留強度に収束した。過圧密比を 3 にした場合も同じように瞬間的なピーク強度が発現した。以上のように、ひずみ制御試験においても、垂直応力減少試験と同様に大変形履歴を受けたすべり面のせん断強度に圧密履歴によるせん断強度の増加が見られた。

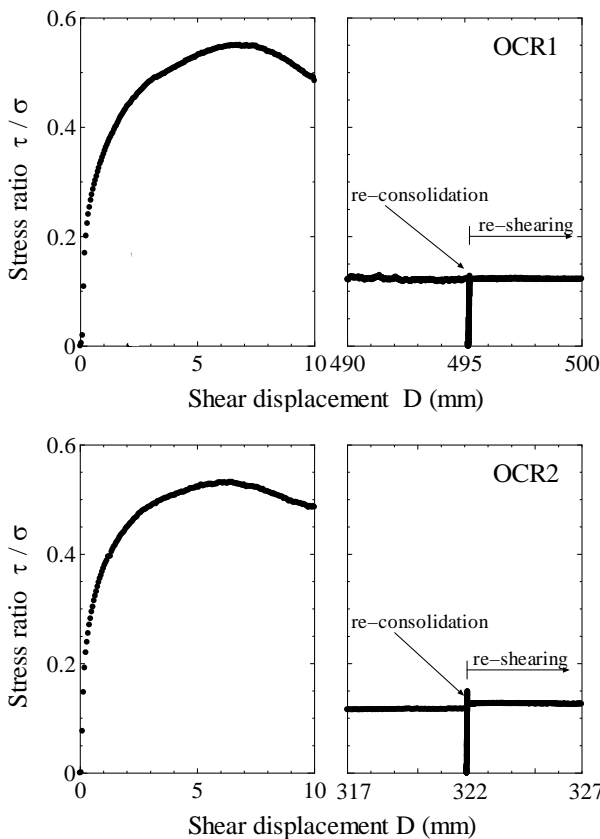


図7 再圧密を考慮したひずみ制御試験

### 3.5.3 回復強度の検討

図8は、せん断・停止・再圧密を行った供試体に対して、ひずみ制御試験より得た回復強度と垂直応力減少試験より得た破壊強度をプロットしたものである。このように、せん断後に応力履歴を与えた状態を初期状態とした結果、せん断方式に依らず再圧密効果による回復強度が発現し、再せん断時の回復強度はほぼ等しくなることが明らかになった。

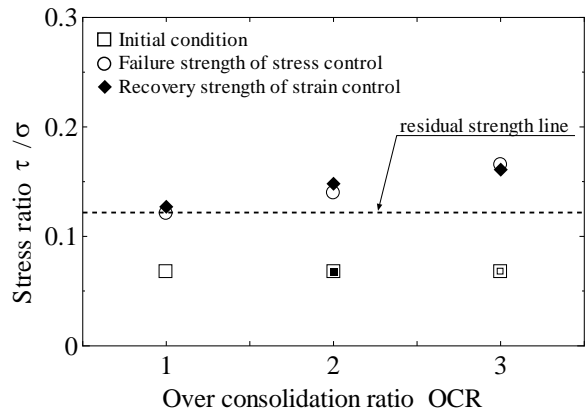


図8 回復強度の検討

## 4. まとめ

本研究にて得られた知見を以下に箇条書きする。

沖見地すべり採取粘土を用いてリングせん断試験による応力制御試験を実施した。供試体はせん断履歴を与えないもの(初生すべり型地すべり)と大変位を与えて残留状態にしたもの(再すべり型地すべり)を用いた。予備試験より完全排水条件を確保するための応力減少速度、垂直応力減少試験における降伏点および破壊点の求め方を定めた。

初生すべり型試験では、有効垂直応力の減少に伴い供試体は弾性的な挙動を示し、降伏点が完全軟化強度線上に位置した。一方、破壊点は完全軟化強度線に対してほぼ平行な位置に得られた。さらに初期状態の過圧密比を変化させた場合、降伏点強度に変化はないが破壊点強度はより大きくなる。このときの変位量は過圧密比に依らずほぼ等しくなった。

再すべり型試験では初生すべり型試験と異なり、供試体はほとんど変形せずに脆性的に破壊した。降伏点と破壊点の区別はほとんどつかず、破壊点は残留強度線上に位置した。このようにせん断面が形成されると接触面の粘着力は発現せず、せん断強度が摩擦則によってのみ支配される。

再滑動地すべりの再圧密を想定してすべり面に応力履歴を与えると、過圧密比が大きいほど破壊強度は大きく得られた。さらに、再圧密を想定したひずみ制御試験を実施したところ、大変形後の応力履歴によって再せん断時には残留強度よりも大きなピーク強度(回復強度)が発現した。両試験における回復強度はほぼ等しく、鏡肌を形成した粘土において再圧密効果が現れた。