

# 滑動履歴による地すべり斜面の強度特性と骨格変形係数の逆算による破壊予測

防災設計工学研究室 川島 健介  
指導教官 大塚 悟

## 1. はじめに

降雨・融雪に起因する再滑動型地すべりはすべり面に作用する間隙水圧の増加によって有効応力が低下し、せん断強さが低下して発生する。すべり面の粘土はせん断履歴と地下水位の変動履歴を受けて特異なせん断強度を示す。本研究は初生すべりと再滑動型地すべりにおける間隙水圧変化を模擬したリングせん断試験を用いて滑動履歴がせん断強度特性に及ぼす影響について検討した。

また滑動中の地すべりには有限変位にとどまる事例と完全崩壊に至る事例があり、変位計測による破壊予測が防災上重要である。地すべりの滑動については計測事例から時間依存性を示すことが明らかにされており、地すべり挙動の分析にはクリープ理論が用いられる。しかし、地すべりは降雨や融雪などによる地盤の間隙水圧の変化に起因して生じることから、変位のほかに地下水位や間隙水圧などの外的要因の変化を取り入れた地すべり挙動の把握が望ましい。本研究では地盤全体の有効応力に関する剛性を表す骨格変形係数を新しく定義して破壊予測に応用した。

## 2. 試料と試験方法

降雨・融雪に起因する再滑動型地すべりにおけるすべり面粘土のせん断強さは完全軟化強さから残留強さの間にあると考えられる。この状態ですべり面に作用する間隙水圧が増加してせん断強さが低下して変形が生じる。そこで、リングせん断試験では斜面内部の応力状態を模擬するために、残留状態にある粘土に対して滑動力に相当するせん断応力を载荷したまま、間隙水圧を増加させることとした。リングせん断試験機では試験機の機構上排水条件を満足することは難しい。そこで間隙水圧増分に等しい垂直応力を減少させる垂直応力減少試験を実施した。本研究では、圧密排水条件下で強制変位を与えて残留状態にする、残留時のせん断応力を载荷したまま垂直応力一定下にて再圧密する、残留せん断強さ以下のせん断応力を载荷して垂直応力を一定速度にて低下させて供試体を破壊させる、手順で試験を行った。また、初生型地すべりとの比較を行うために、強制変位を事前に与えていない状態を初期とした垂直応力減少試験も実施した。

リングせん断試験では要素性(試料の一樣性)を満足しつつ大变位を与えられる特徴があるが、三軸試験機による間隙水圧载荷試験は破壊近傍にて要素性を喪失したり、大变位を与えられない。しかし、試料の間隙水圧を強制的に上昇させる際のせん断過程や、供試体の内部が不様になることを逆手にとって地すべり斜面の一種のモデル試験と見なすことによって、土水連成挙動の発現様式を把握することが出来る。本研究では骨格変形係数の適用性の検討にあたっては三軸試験機を用いた間隙水圧载荷試験を模型試験として利用した。試験は過圧密比に応じた応力履歴を与えた後に、所定の軸差応力を非排水条件にて载荷して初期状態とした。間隙水圧载荷過程では軸差応力を一定に制御して試料下端部にて強制的に間隙水圧を段階的に载荷する。

本研究では、地すべり地のすべり面付近のボーリングコアから採取した泥岩試料およびカオリン粘土、藤ノ森粘土の再構成試料を用いる。

## 3. 間隙水圧増加過程のせん断挙動

図-1にせん断履歴のない泥岩再構成試料を用いた垂直応力減少過程における応力経路と変形挙動を示す。本研究ではせん断変位速度が急増する降伏点、せん断応力を一定に保てなくなる破壊点を閾値として定義しており、これも図示している。間隙水圧増分と等価な垂直応力を減少させると、供試体は吸水を伴う弾性変形

をする。ある有効応力まで低下すると、せん断変位速度が急増して破壊点に至る。降伏点は初期垂直応力によらず、試料のせん断抵抗角を示す直線にほぼ一致した。破壊点は強度線より左方に位置しており、これを線形近似して得られる破壊強度はせん断抵抗角とほぼ同じになるが、粘着力成分が発現した。この挙動は三軸試験機による間隙水圧荷重試験と同様の結果を与える。連続体理論をベースとした間隙比を中心とした力学にて説明することが可能である。一方、大変位を与えて残留状態にある試料に対して垂直応力減少試験を行った結果を図-2に示す。せん断履歴がない場合は初期より弾性変形が生じていたのに対し、降伏点までほとんど変位が生じず、降伏点に達すると変位が急増した。したがって降伏点と破壊点を区別できず、脆性的に破壊する。大変位によるすべり面の形成に伴ってせん断抵抗角がほぼ残留せん断抵抗角まで低下しているの、小さな垂直応力の減少によって破壊に至る。しかし、降伏・破壊点は残留せん断抵抗角 $\phi_r$ による直線に対して大きく得られた。せん断抵抗角は残留せん断抵抗角とほぼ一致するが、粘着力成分が発現した。この挙動は連続体理論に基づくよりも不連続面の摩擦則によってより理解することができる。

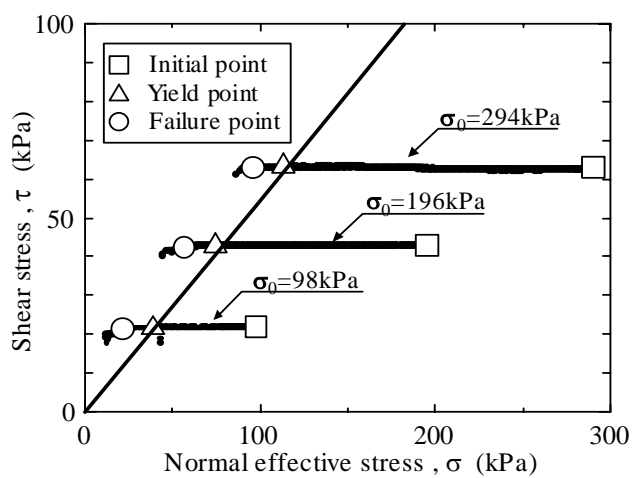


図-1 荷重履歴のない粘性土のせん断挙動

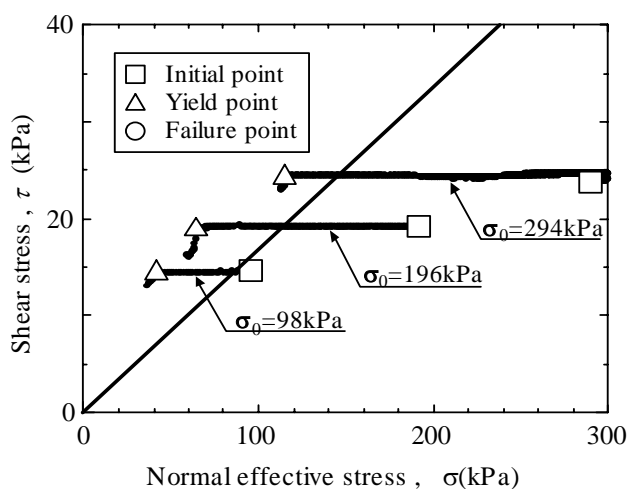
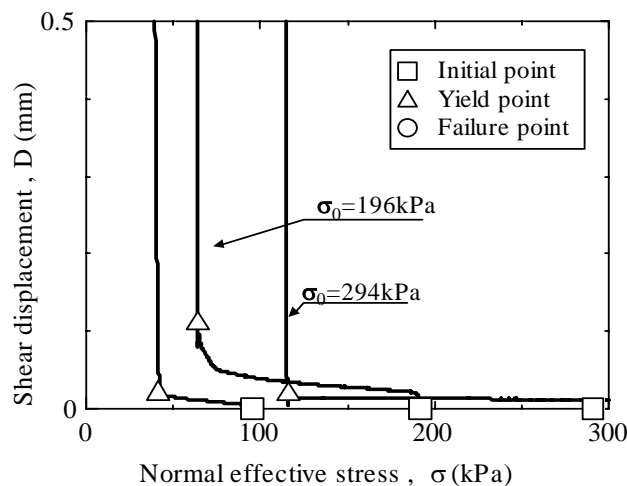
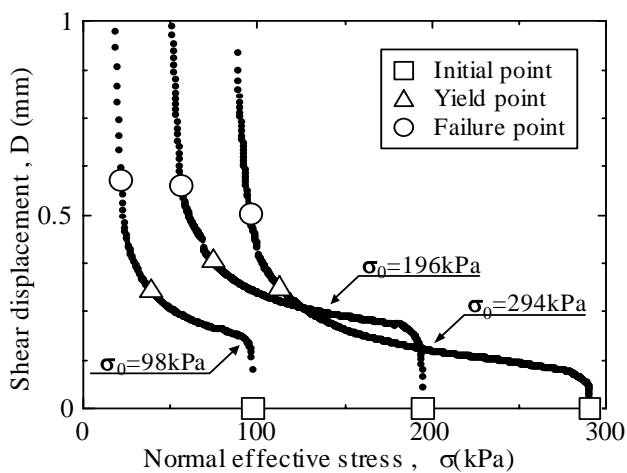


図-2 大変位を受けた粘性土のせん断挙動



#### 4. 初期過圧密比が強度特性に与える影響

試料の初期過圧密比を変化させて試験を行った。図-3は初期状態が荷重履歴の無い場合、図-4は履歴を与えて残留状態にある場合の降伏および破壊強度と強度線を比較したものである。荷重履歴がない場合に降伏点は初期過圧密比によらず限界状態線上に得られたが、破壊強度は排水試験と同様に過圧密なほど大きくなる傾向を示した。一方、初期状態が大変位履歴によって残留状態にある場合に降伏応力と破壊応力はほぼ一致し、

多少のばらつきはあるものの初期過圧密比によって変化しないことがわかる。

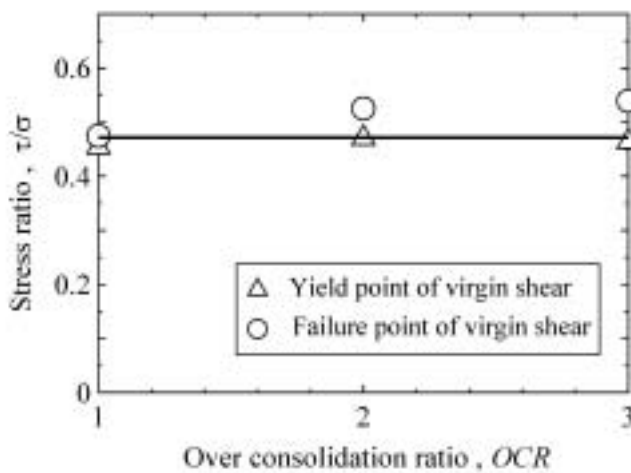


図-3 荷重履歴のない粘性土の強度特性

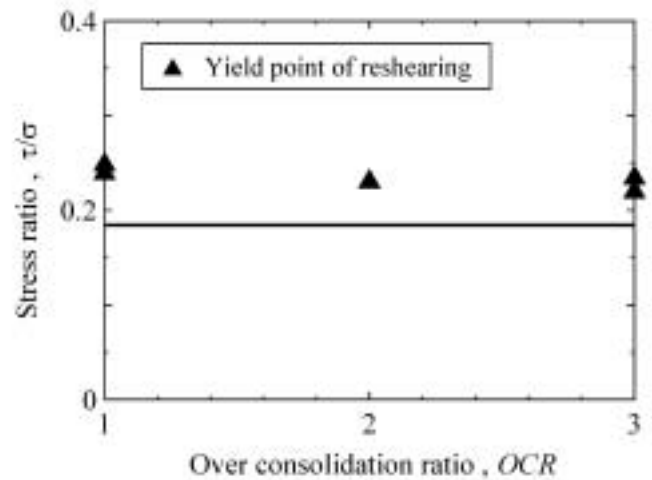


図-4 大変位を受けた粘性土の強度特性

### 5. 二次クリープ速度と破壊時間の関係

地すべりの破壊予測の方法に二次クリープにおける地すべり変位速度と破壊時間との間の経験則を用いる方法がある。間隙水圧載荷試験にて観察される二次クリープ速度と破壊時間との関係を図-5に整理する。図には破壊応力までの時間および5%ひずみに至る時間を用いて整理した。データにばらつきがあるもの的大略的には斉藤が提案するように2次クリープ速度と破壊時間との間に線形関係が存在する。しかし、間隙水圧試験のように比較的試験条件の制御された条件にても2次クリープ速度と破壊時間の関係にばらつきは大きく、この図を用いて破壊時間を精度よく予測することは難しい。

### 6. 骨格変形係数による破壊予測

間隙水圧載荷試験にて得られる間隙水圧と軸ひずみの関係を図-6に示す。供試体は要素試験から模型試験までの性質を有することから、図の間隙水圧や軸ひずみは供試体を代表するものではない。しかし、荷重下のせん断挙動の解を表しており、間隙水圧とひずみの比は有効応力に関する供試体の全体剛性（骨格変形係数

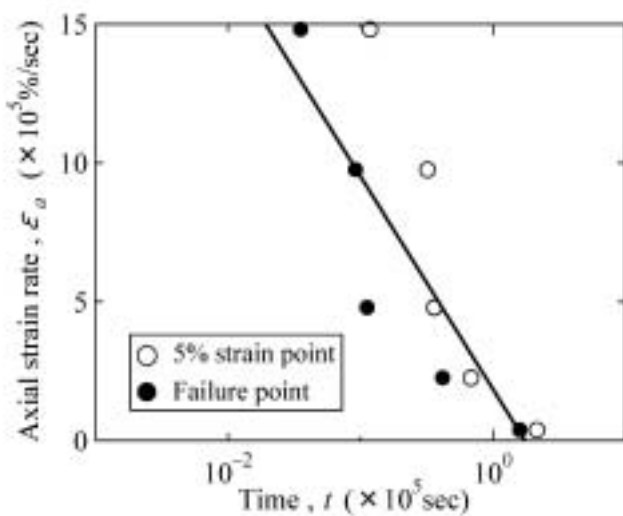


図-5 二次クリープ速度と破壊時間の関係

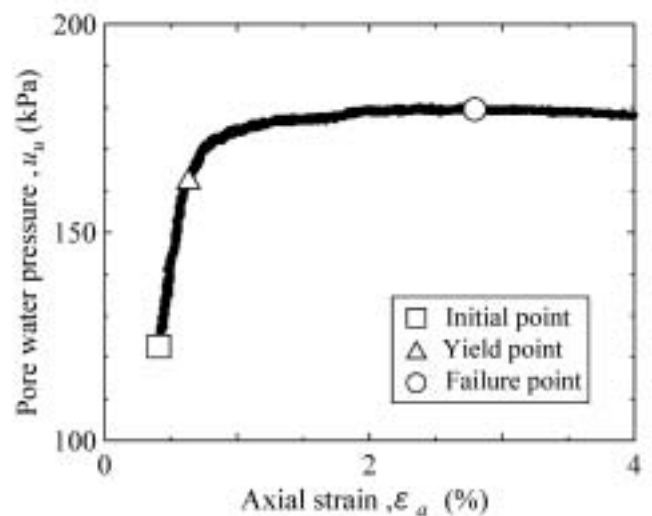


図-6 軸ひずみと間隙水圧の関係

と定義)を表している。骨格変形係数は図の間隙水圧～軸ひずみ関係の勾配を表すことから、変形の進展に伴う剛性低下を表現する。骨格変形係数をリアルタイムにて算出することにより、破壊予測を合理的に行うことができる。図-7に接線骨格変形係数の時間変化を示す。間隙水圧～軸ひずみ関係は連続的に見えるが、接線勾配をとると計測誤差によるばらつきが大きい。図中に降伏応力および破壊応力を示したが、降伏応力までは比較的骨格変形係数が一定値であるのに対して降伏応力以降は骨格変形係数が単調に減少している。破壊応力近傍にて骨格変形係数はほぼゼロにまで低下しており、供試体のせん断挙動をほぼ正確に表現している。他方、図-8に割線骨格変形係数～時間関係を示すが、接線骨格変形係数の時間変化とほぼ同様の関係が得られた。接線骨格変形係数に対してばらつきが小さい傾向が見られ、安定した結果を与えている。降伏応力以降に割線骨格変形係数は単調減少するが、破壊応力に達しても必ずしもゼロには至らない。これは割線係数の特徴であり、どの値にて破壊を判定するのか課題が残る。どちらの骨格変形係数にも一長一短があるが、従来の方法に対してより合理的に破壊予測が可能になることが示された。

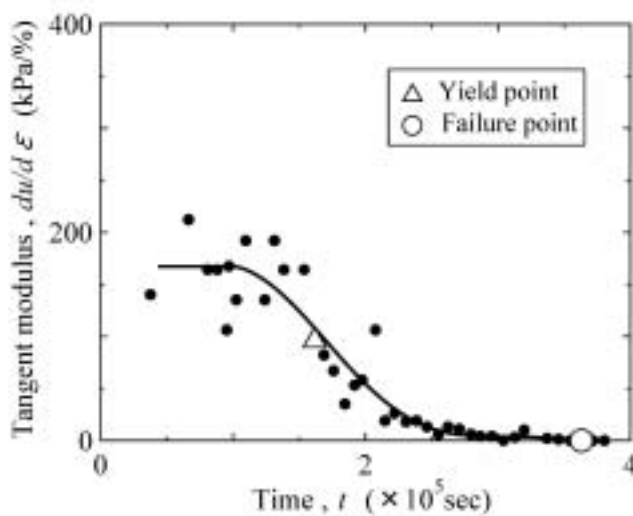


図-7 接線骨格変形係数の経時変化

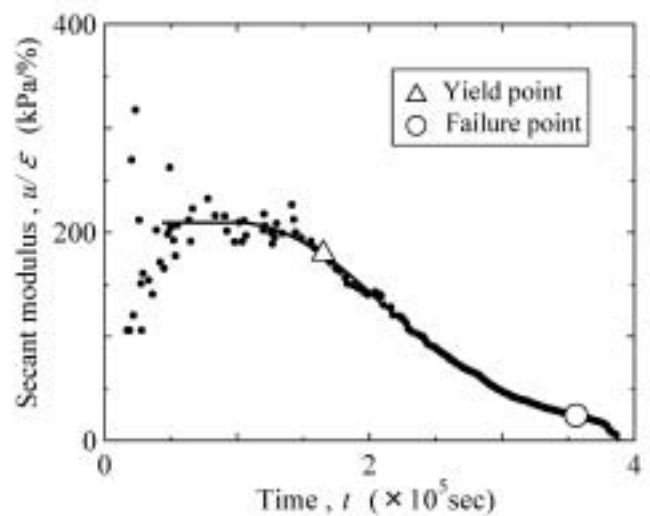


図-8 割線骨格変形係数の経時変化

## 7.まとめ

リングせん断試験による再滑動型地すべりにおける強度特性を検討した結果、以下の知見が得られた。

荷重履歴を事前に与えない初期せん断試験では降伏点が限界状態線（せん断抵抗角）上に得られた。破壊点は過圧密比に応じて変化して過圧密比が大きいほど水圧载荷に耐えられる。

試料に履歴を与えて残留状態にある試料の垂直応力減少試験を行うと変形の発生しない結果が得られた。降伏点まで変形が発生せずに、そのまま脆性的に破壊する。破壊点は降伏点にはほぼ等しい結果が得られた。粘性土のせん断抵抗角はせん断履歴によって著しく低下する。残留状態に到達した試料の再滑動に対する抵抗力は残留状態のせん断抵抗角によって発揮される。しかし、降伏点ならびに破壊点は限界状態線に平行な直線となり、粘着成分が現れた。初期せん断試験とは傾向の異なることから詳細な検討試験が課題に残された。

また、骨格変形係数を用いた破壊予測法に関する検討では、以下の知見が得られた。

逆算される骨格変形係数は供試体の構造剛性の低下を合理的に表現する。変形挙動から骨格変形係数をリアルタイムにて算出することにより、破壊予測を行うことが可能である。

実験結果は測定誤差などの影響を受けるために変位が小さいレベルでは逆算精度が低い、降伏点を越えて塑性変形が卓越すると精度良く予測可能なことが示された。