

# 間隙水圧の載荷による過圧密粘土のせん断及び時間依存性挙動に関する研究

防災設計工学研究室 清住 真  
指導教官 大塚 悟

## 1. はじめに

北陸地方の地すべりは緩速的に繰り返し滑動する点に特徴がある。そこで、本研究ではこのような現象の解明を目的として、土水連成挙動に着目し三軸試験機を用いて実験的に研究を行う。これまでの研究成果として、数値シミュレーションから繰り返し水圧載荷を受ける供試体のせん断強度特性を表す破壊包絡線を見出した。そこで、今年度は間隙水圧載荷試験を行い実験的に破壊包絡線を求め、数値シミュレーションから得られた破壊包絡線との整合性を確認する。また、試験結果は進行性破壊に着目した考察を行い緩速破壊のメカニズムの解明を試みた。

## 2. 降伏点、破壊点の定義

地すべりの発生は降雨や融雪による間隙水圧の変化に起因して発生すると考えられる。そこで、供試体に破壊ポテンシャルとして軸差応力を一定に作用させ、供試体下端部に強制的に間隙水圧を段階的に載荷する間隙水圧載荷試験を行った。試験結果より(図.1 参照),供試体が弾性限界を示す降伏点と変位が急増する破壊点を見出した。弾塑性構成式による数値シミュレーションでは降伏点までの挙動と破壊点での平均有効応力は精度良く一致した。

## 3.1 応力履歴試験の数値シミュレーション

地すべり斜面の粘土は当初過圧密な状態にあると考えられる。そこで、過圧密な供試体への繰り返し水圧載荷の数値シミュレーションを行った。破壊点まで水圧を載荷した後、水圧を所定のレベルまで除荷させ有効応力を回復させる。その後、再び水圧載荷を行い破壊点まで到達させ、この作業を繰り返す。数値シミュレーション結果より(図.2 参照),水圧の載荷、除荷によって間隙比が膨張して次第に

正規圧密状態に近付き、より小さな水圧載荷で破壊することを見出した。それぞれの破壊点を連ねると一本の破壊包絡線が描ける。この破壊包絡線は繰り返し水圧載荷を受ける粘性土のせん断強度特性を表すものである。軸差応力を変えて同様に数値シミュレーションを行うと、軸差応力毎の破壊包絡線が得られる。

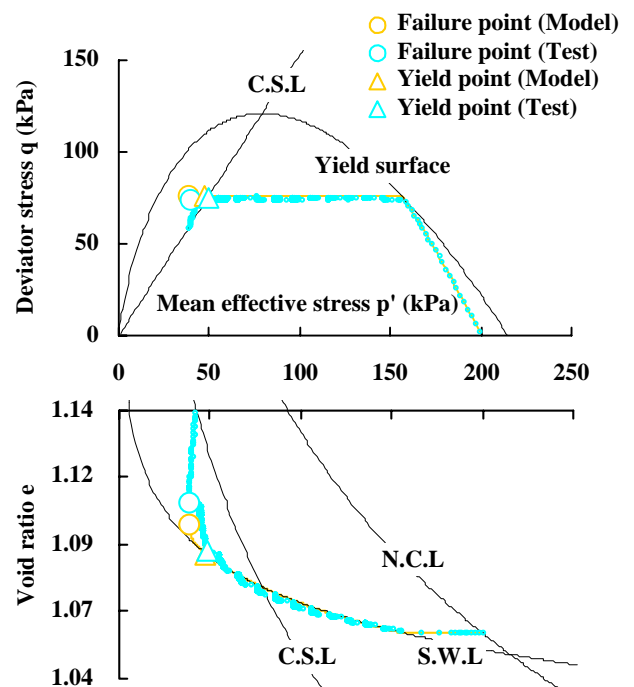


図.1 試験結果と数値シミュレーション

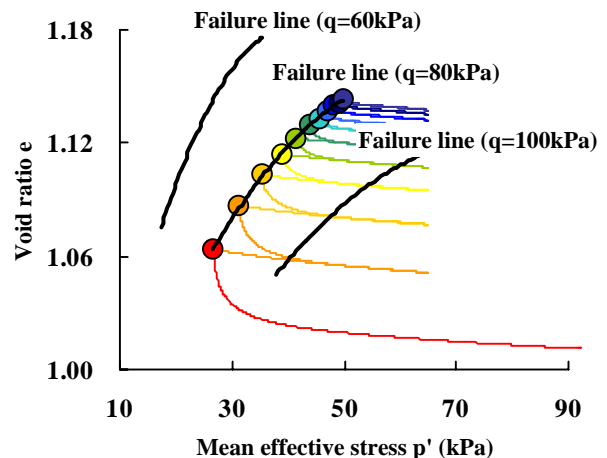


図.2 応力履歴試験の数値シミュレーション

### 3.2 破壊包絡線を得るための試験方法

実験的に破壊包絡線を得るために、三軸試験機を用いて単一供試体に応力履歴試験を行った。しかし、試験中に破壊点を判定することが困難なため、破壊包絡線を得ることができなかった。そこで、過圧密粘土が水圧の繰り返し载荷により次第に正規圧密状態に近づくことに着目した。図.3 に過圧密比を変えた複数の単調载荷試験と応力履歴試験の数値シミュレーション結果を示す。図より、応力履歴試験から得られる破壊包絡線と単調载荷試験での破壊点が一致した。このことから、過圧密比を変えて複数の単調载荷試験を行うことで破壊包絡線が得られることを確認した。

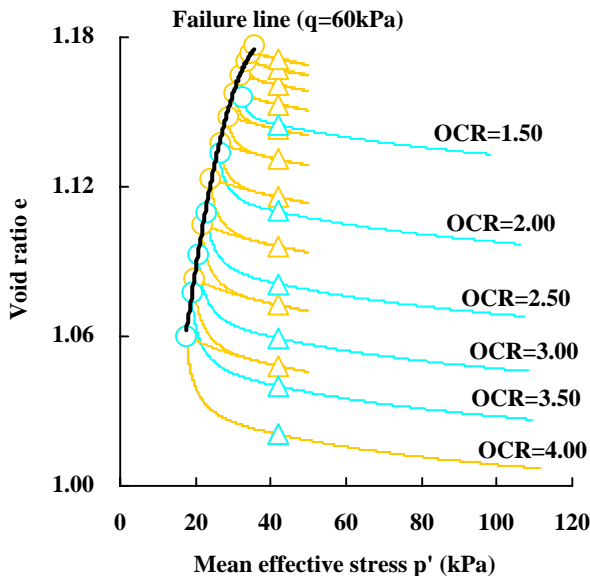


図.3 単調载荷試験の数値シミュレーション

### 3.3 試験結果

図.4 に軸差応力 ( $q = 60kPa$ ) の過圧密比を変えた複数の単調载荷試験の結果を示す。図.4 より、実験的に破壊包絡線を確認することができた。数値シミュレーションは降伏点までの挙動は良く再現しているが、降伏点以降の挙動には差異を生じている。数値シミュレーションでは降伏点以降は平均有効応力の減少に伴って間隙比が緩やかに増加していくが、実験は急激に間隙比が増加し小さな水圧载荷で破壊に至っている。

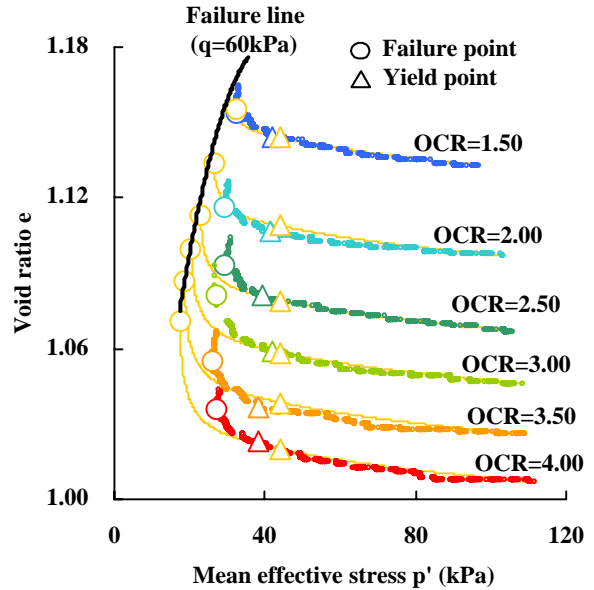


図.4 複数の単調载荷試験の結果

図.5 に単調载荷試験から得られる破壊点と数値シミュレーションから得られる破壊包絡線を示す。図.5 より、実験的に軸差応力毎の破壊包絡線を確認することができた。しかし、実験から得られる破壊点は過圧密比が大きくなるほど数値シミュレーションから得られる破壊包絡線に対して差異を生じている。これは、数値シミュレーションは要素としての挙動を表しているのに対して、実験では降伏点以降は塑性変形が発生し要素性が喪失していると考えられる。これが原因となり、実験と数値シミュレーションに差異を生じると考えられる。

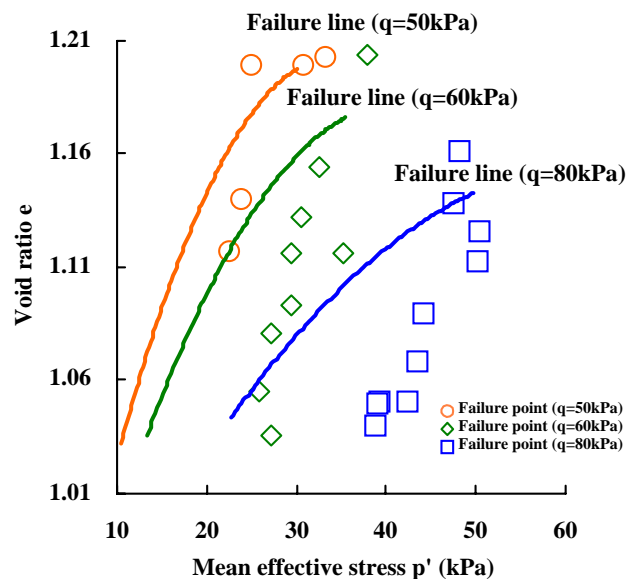


図.5 軸差応力毎の破壊包絡線

#### 4.1 供試体の要素性の喪失

図.6 に軸差応力が  $q = 80 \text{ kPa}$  , 過圧密比が  $OCR = 2.00$  ,  $OCR = 4.00$  の供試体の含水比分布を示す。測定は軸ひずみが 20% に到達した時に行った。図.6 より、供試体の含水比分布は変形の局所化領域では著しく変化しており供試体の要素性が喪失されている。このことより、数値シミュレーションが降伏点以降の挙動を再現できない原因は要素性の喪失だと言える。また、過圧密比による含水比分布の影響は、過圧密比が大きい方が著しく含水比が変化している。このことより、過圧密比が大きいほど要素性の喪失による強度低下が著しく、過圧密比が大きくなるほど数値シミュレーションでは降伏点以降の試験結果を再現できない現象を裏付けている。

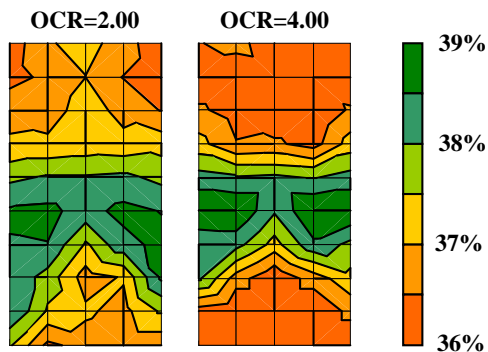


図.6 供試体の含水比分布

#### 4.2 供試体の状態変化過程

図.7 に含水比分布を測定した供試体の供試体上端にて観測される水圧の経時変化を示す。水圧の経時変化は各载荷ステップにおいて上に凸の曲線となり、供試体下端での水圧が上端へ伝達されるにはある時間が必要である。また、過圧密比が大きいと破壊時間が長期化している。これは、水の移動に伴う進行性破壊が起因していると考えられる。降伏点以降の供試体には塑性変形が発生し、せん断に伴うダイレイタンスによって吸水膨張を起こす。粘性土は吸水膨張を起こすと軟化するためせん断抵抗力が低下し、塑性変形が新たに発生する。水の移動に伴う進行性破壊はダルシー則に従うため極めて長期間に亘って行われる。また、破壊に近付くと水の移動と塑性変形の発生が繰り返し生ずるため長時間に亘って

変形が生じていると考えられる。このような変形が長期に亘って生じる進行性破壊は緩速破壊のメカニズムに対応するものと考えられる。

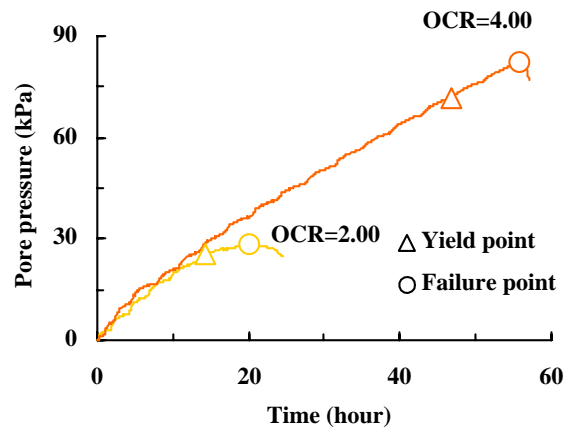


図.7 载荷水圧の経時変化

#### 4.3 クリープ挙動

図.8 に実際の斜面にて観測されるひずみと時間の関係を模式的に示す。地すべりは移動速度が非常に遅くクリープ的な時間依存性挙動を示す。これまでの地すべりに見られる時間依存性挙動の研究はクリープ挙動を用いた破壊予測に重点が置かれていた。しかし、何故このような挙動を示すのかについてはあまり論じられていない。そこで、水の移動に伴う進行性破壊に着目してクリープ挙動の考察を行う。

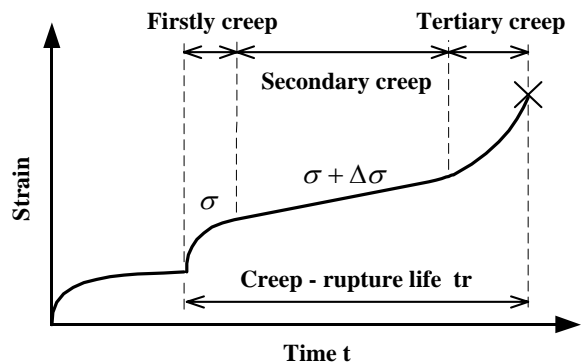


図.8 クリープ挙動

図.9 に本研究で観測されたクリープ挙動を示す。なを、水圧の最終载荷ステップを 0 時間として時間スケールを取り直してある。1 次クリープは水圧载荷によるひずみの発生とその後の定常状態への移行を示している。2 次クリープは開始位置が不明確であるが、水圧の伝達がある程度終了した時点とした。

水圧は一定値を保っているが、ひずみは増加して供試体の剛性低下が生じていると考えられる。3次クリープの開始位置は応力状態から定義した破壊点と一致した。2次クリープから続く剛性低下に加えて、軟化挙動と吸水膨張が繰り返し起こる進行性破壊によってひずみが急増して破壊に至ったと考えられる。

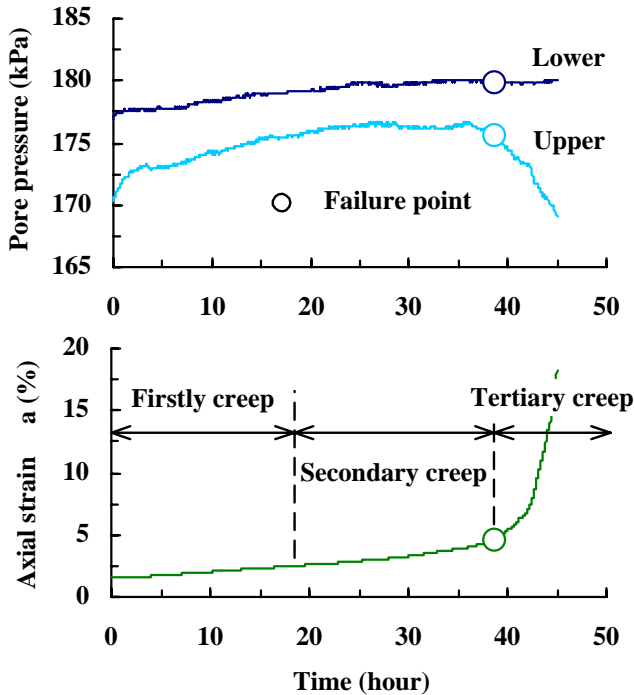


図.9 観測されたクリープ挙動

### 5. 時間依存性挙動の新たな課題

図.10 に軸差応力が  $q = 60kPa$  の軸ひずみの経時変化を示す。図.10 より、過圧密比が大きくなるほど破壊時間は長期化しているが、過圧密比がある程度大きくなると破壊時間がほぼ等しくなっている。これは破壊までの間隙比経路に原因があると考えられる。図.11 に破壊に至るまでの間隙比経路の予想図を示す。ここで、破壊時の供試体すべり面での間隙比は初期状態に依らず同じであると仮定をする。図.11 より、 $OCR = 1.00$  と  $OCR = 3.50$  の破壊までの間隙比経路は距離には大きな差が有り、これが破壊時間の長期化に影響していると言える。しかし、過圧密比が大きくなるほど破壊までの間隙比経路には差がなくなる。これが起因して破壊時間が等しくなると考えられるが、実証実験は今後の課題である。

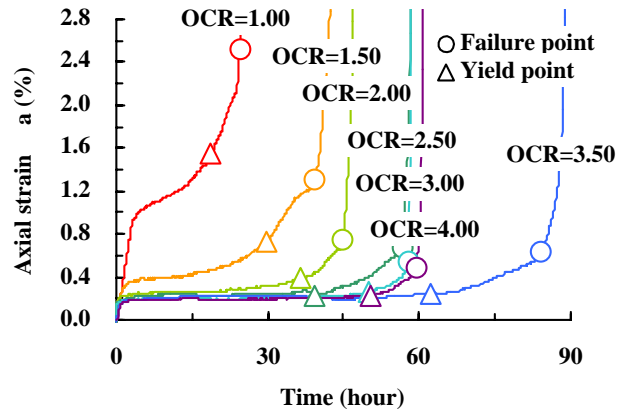


図.10 軸ひずみの経時変化

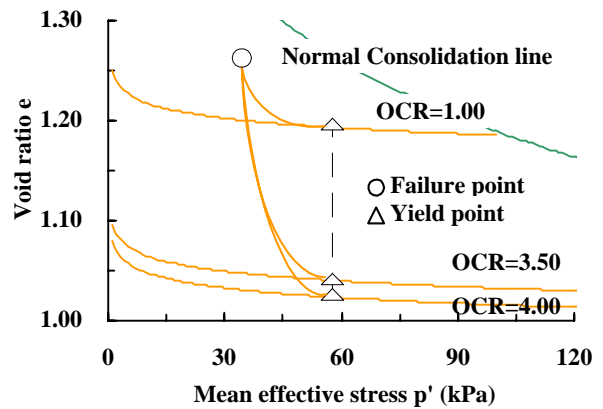


図.11 破壊に至るまでの間隙比経路の予想図

### 6. 結論

実験的に軸差応力毎の破壊包絡線を確認した。得られた破壊包絡線は数値シミュレーションから得られるものとは異なる結果となった。過圧密比が小さいものは一致するが、過圧密比が大きくなると差異を生じる。

破壊した供試体の含水比分布を測定し、破壊時の供試体は水の移動に伴う進行性破壊により要素性が喪失されていることを確認した。要素性の喪失により、数値シミュレーションと実験結果には差異を生じる。

実際の斜面で観測されるクリープ挙動を水の移動に伴う進行性破壊に着目して考察を行った。水の移動に伴う進行性破壊はダルシー則に従うため極めて長期間に亘って行われる。この現象は地すべりの緩速破壊に対応している。