

間隙水圧载荷試験による地すべりの時間依存性挙動に関する実験的検討

防災設計工学研究室 齊藤 慶一郎

指導教官 大塚 悟

1. 序論

地すべりは降雨や融雪による地下水位の上昇により、地すべり粘土のせん断抵抗力が低下することで発生すると考えられる。地すべりの変形挙動は時間依存性を示すことから、従来クリープ理論を用いて説明されてきた。これに対して、地すべりの時間依存性挙動を水の移動に伴う進行性破壊の視点から再検討する試みが著者らによって行われている¹⁾。

本研究では、地下水位の上昇による地すべりの時間依存性挙動を実験的に調べることを目的として間隙水圧载荷試験を行った。供試体の挙動を破壊挙動、破壊形態などの面から詳細に観測し、また供試体の剛性をマクロ的な視点から定義することで、地下水位上昇による地すべり粘土の剛性低下を実験的に調べる。

2. 試験方法

試料は藤ノ森粘土 ($\rho_s=2.688\text{g/cm}^3$ 、 $LL=46.7\%$ 、 $PL=18.8\%$) を用いる。ミキサーにより一様に練り混ぜた粘土スラリーを、飽和させるため圧密容器にて脱気する。十分に飽和した粘土スラリーを圧密圧力 75kPa で予備圧密し、トリミング法により $5 \times 10\text{cm}$ の円柱形に成形し供試体とする。

図-1 に示す 3 軸圧縮試験装置にセットした供試体を、所定の過圧密比になるように圧密、膨潤させる。その後、上載圧として所定の軸差応力まで非排水载荷し、軸差応力を一定に保った状態で供試体の下端から間隙水圧を強制的に载荷する。間隙水圧の载荷は 2kPa ずつの段階载荷とし、供試体下端から载荷した間隙水圧が供試体上端にて観測された時点で次の载荷ステップに移行する。間隙水圧の上昇により供試体が生ずる挙動を破壊挙動、破壊形態などの面から詳細に観測する。

3. 間隙水圧载荷試験による供試体の挙動

図-2 に間隙水圧の载荷を受けた粘性土供試体が生ずる有効応力経路および間隙比経路を示す。供試体は間隙水圧の载荷とともに降伏点以前は弾性的な挙動を示すため等方膨潤線上を弾性的に移動する。降伏点を経過すると供試体には塑性変形が発生するため、間隙比経路は等方膨潤線上を外れる。その後供試体の状態点が破壊点に到達すると、供試体は一気に膨張し破壊に至る。

降伏点を経過すると塑性変形の発生とともに供試体内部にはせん断変形の局所化領域が生じ、供試体内部は不様な状態となる。せん断変形が局所化することにより供試体内部には水頭差が生じ、それに従いせん断の局所化領域に水が移動することで、供試体の挙動は水の移動に伴う進行性破壊を示す。進行性破壊は実際の地すべり

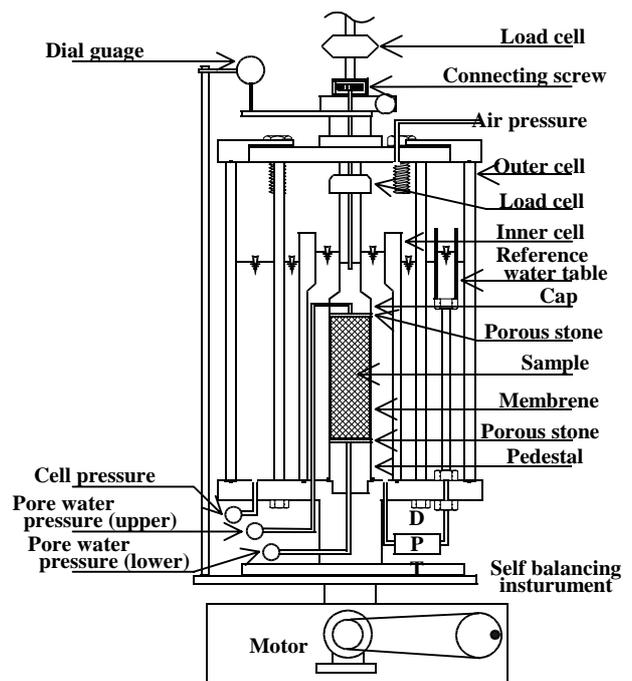


図-1 3 軸圧縮試験装置

にても確認されており、問題とされている現象である。従って、間隙水圧载荷試験による粘性土の挙動は地すべり現象を再現しているといえる。

4. 破壊包絡線

地すべりは地下水位の上昇、下降に従い、滑っては止まりを繰り返しながら滑動するといわれている²⁾。そこで、間隙水圧の繰り返し载荷を受ける粘性土供試体の挙動を調べるために、過圧密比の異なる複数の供試体で間隙水圧载荷試験を行った。その結果を図-3に示す。図には、下負荷面修正カムクレイ構成式による数値シミュレーション結果も併せて示している。

間隙比経路は過圧密比の異なる供試体ごとに異なる位置に得られており、過圧密比の大きな供試体ほど大きな間隙水圧载荷に耐えられることを示している。数値シミュレーション結果と比較すると、試験結果は数値シミュレーション結果よりも小さな間隙水圧载荷にしか耐えることができない結果となっている。これは、数値シミュレーションでは試験開始から破壊に至るまで常に要素としての挙動を示しているのに対して、実際の粘性土供試体は塑性変形の発生とともに供試体内部が不様となるためである。また、それぞれの破壊点は一本のライン上にプロットされる。本研究では、この破壊点を連ねた一本のラインを破壊包絡線と定義する。破壊包絡線は過圧密状態にある地すべり粘土が地下水位の上昇、下降に伴う間隙水圧の増加、減少を繰り返し受けた場合の状態変化過程を示していると考えられる。従って、地すべり粘土は間隙水圧载荷を繰り返し受けることで次第に正規圧密粘土化してゆくと考えられる。

5. 軸ひずみ、体積ひずみの経時変化

過圧密比の異なる複数の供試体で間隙水圧载荷試験を行った結果より得られた軸ひずみおよび体積ひずみの経時変化を、それぞれ図-4および図-5に示す。

軸ひずみおよび体積ひずみの経時変化より、破壊時間は過圧密比が大きい供試体ほど長期化する傾向があることがわかる。これは、過圧密比が大きい供試体ほど剛性が高いことに加えて、供試体の状態が密であるためであ

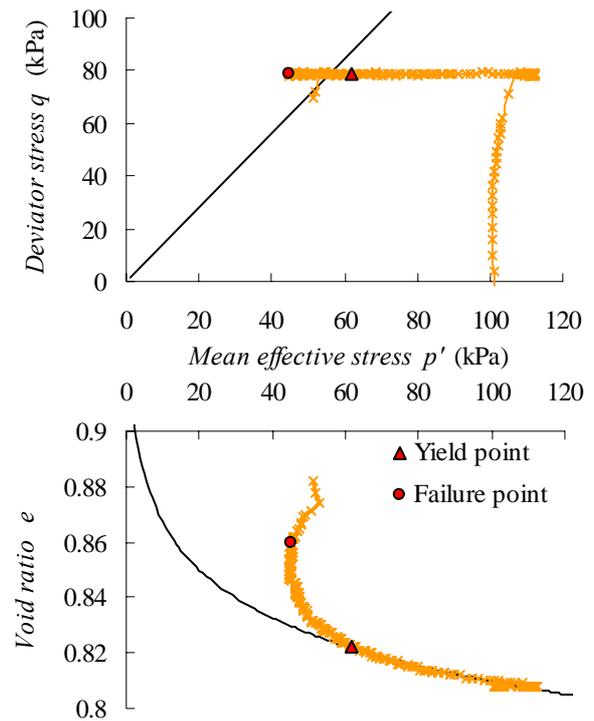


図-2 有効応力経路および間隙比経路

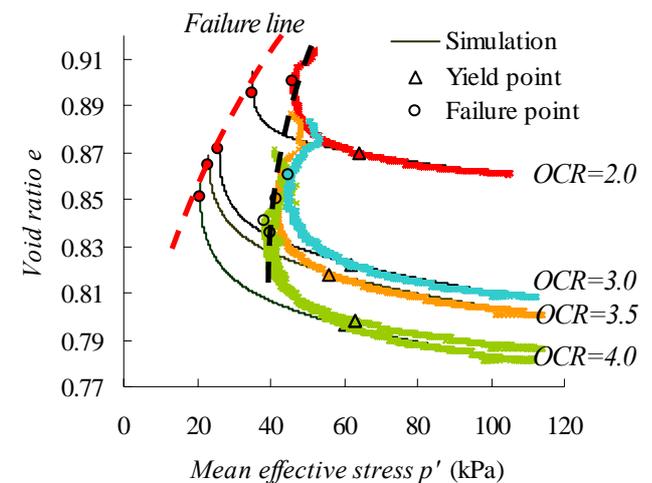


図-3 破壊包絡線

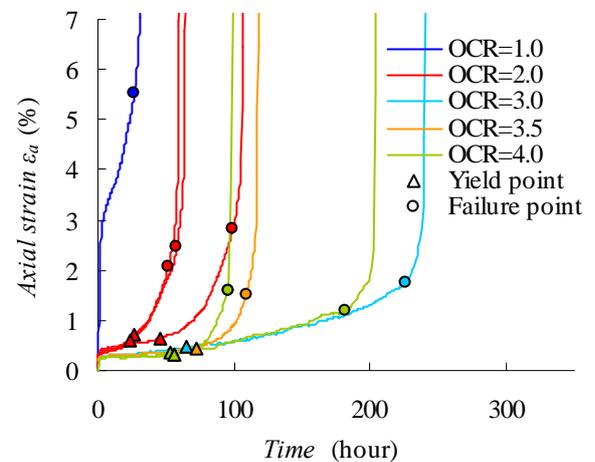


図-4 軸ひずみの経時変化

ると考えられる。供試体は間隙水圧の载荷を受けることで、徐々に吸水膨張し破壊に至る。供試体内部の水の移動はダルシー則に従うと考えられるため、供試体の状態が密であるほど透水係数が低く破壊要因である水の移動が顕著に行われず、結果として破壊時間が長期化すると考えられる。

一方、降伏点を示す軸ひずみおよび体積ひずみは過圧密比によらずほぼ一定値であることが確認できる。降伏点は供試体が弾性状態から弾塑性状態へ移行する遷移点であることから、供試体が弾性挙動を示すことができる軸ひずみおよび吸水量は過圧密比によらずほぼ一定であることを示していると考えられる。また破壊点を示す軸ひずみの値は、過圧密比が大きいほど小さな値となっているが、破壊点を示す体積ひずみの値は過圧密比によらずほぼ一定値となっている。このことは、供試体が破壊に至るまでに可能な変形量は過圧密比が大きいほど少ないに関わらず、破壊に至るまでに可能な吸水量は過圧密比によらないことを示している。

また、同条件にて破壊時間が大きく異なるケースが見られたが、これは破壊形態の違いによることが推測されている。

6. クリープ挙動

地すべりの時間依存性挙動としてクリープ挙動が挙げられる。斉藤はクリープ破壊試験結果から図-6 および図-7 のようにクリープ挙動を定義している。クリープ破壊試験は、供試体に残留強度以上の軸差応力を载荷した状態で供試体を破壊させる試験である。この試験は試験中の供試体内部の応力状態が常に一定であるとする要素試験であり、地下水位の上昇による進行性破壊を起こす地すべり挙動を正確に再現しているとはいえない。

7. 土水連成挙動からの破壊予測法

間隙水圧载荷試験は、地すべりの土水連成挙動を実験的に再現している。従って、間隙水圧载荷試験におけるひずみの変化は間隙水圧の変化と直接的な関係にある。そこで、地すべりの土水連成挙動を実験的に調べる目的で間隙水圧と軸ひずみの関係を調べた。図-8 にその結果

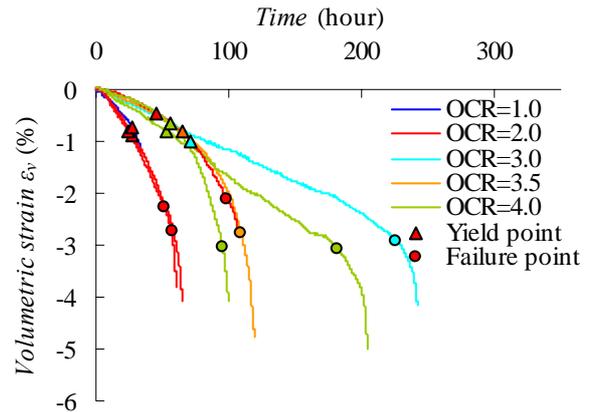


図-5 体積ひずみの経時変化

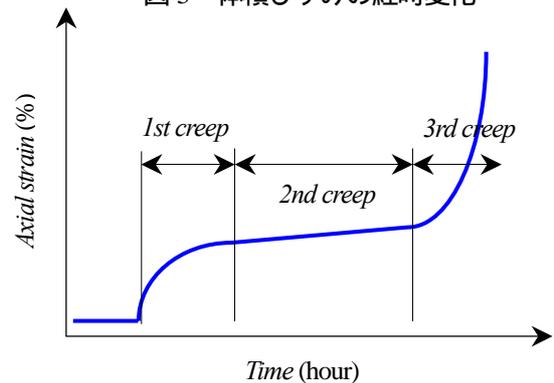


図-6 クリープ挙動 (ひずみ - 時間)

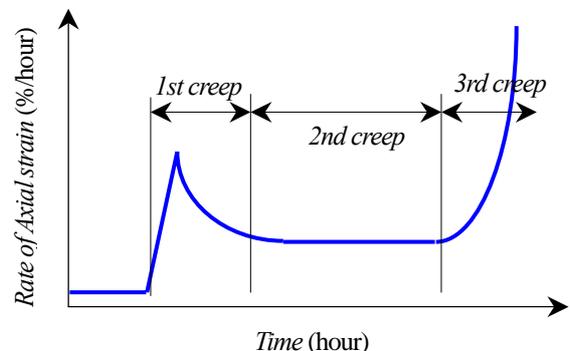


図-7 クリープ挙動 (ひずみ速度 - 時間)

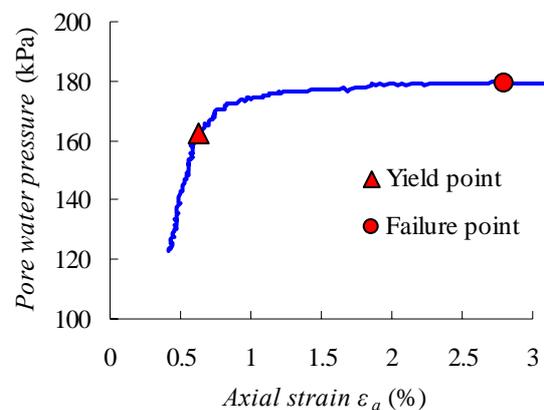


図-8 間隙水圧と軸ひずみの関係

を示す。試験条件は過圧密比 2.0 である。降伏点以前の供試体は弾性挙動を示すため、両者の関係は直線的に増加する。降伏点を経過すると、供試体に塑性変形が発生するとともに間隙水圧の伝達時間が長期化するため、軸ひずみが間隙水圧を徐々に卓越する傾向を示し、供試体は破壊に至る。

全応力理論によると、全応力は有効応力と間隙水圧の和により表される。本試験では、試験中の全応力が常に一定に保たれているため、間隙水圧の増加と有効応力の減少は比例関係となる。従って、ひずみの変化は有効応力の変化に対応しているといえる。そこで、本研究では間隙水圧とひずみの比を有効応力に関する骨格変形係数と定義する。両者の関係における接線関係および割線関係の骨格変形係数を調べた。その経時変化をそれぞれ図-9 および図-10 に示す。

降伏点以前の骨格変形係数は、供試体が弾性挙動を示すため試料の弾性係数を示していると考えられる。測定誤差の影響を受けて上下に変動しているが、接線、割線骨格変形係数ともにおおよそ 100~200 の間にある。降伏点以降の骨格変形係数は、供試体に塑性変形が発生するため減少する傾向を示し、破壊点に近づくにつれ徐々にゼロに向かってゆく。この挙動は供試体内部に生じる変形の局所化領域が徐々に発達していることを意味しており、それに従い供試体の全体剛性が低下することを示している。このことから、骨格変形係数は供試体の状態を内面的な要因を含めた剛性変化を的確に表現することができるといえる。

8. 実地盤での骨格変形係数

間隙水圧載荷試験結果より、供試体の全体剛性を骨格変形係数により表現することができることが明らかとなった。骨格変形係数の実地盤での有用性を確認するために、実際の地すべりデータを用いて骨格変形係数の変動を調べた。地すべりデータ³⁾のひずみおよび地下水圧の経日変化をそれぞれ図-11 および図-12 に示す。地すべり地は、島根県の山陰本線地すべりである。ひずみは、沈下量のデータを推定すべり面の最下端から最上端までの高さで除した値としている。

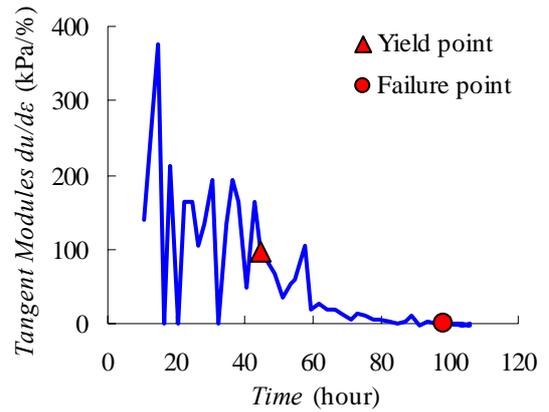


図-9 接線骨格変形係数の経時変化

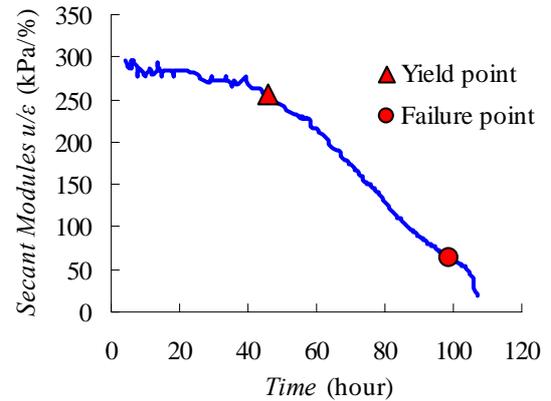


図-10 割線骨格変形係数の経時変化

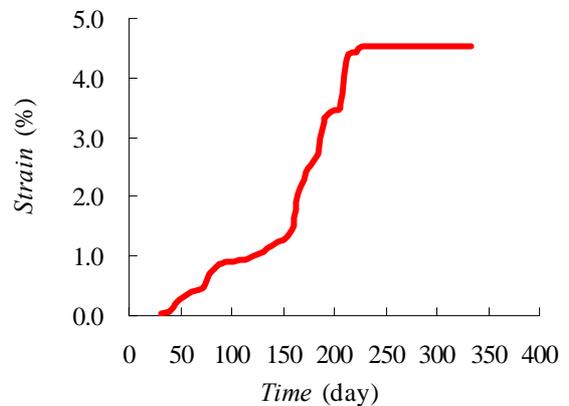


図-11 ひずみの経日変化

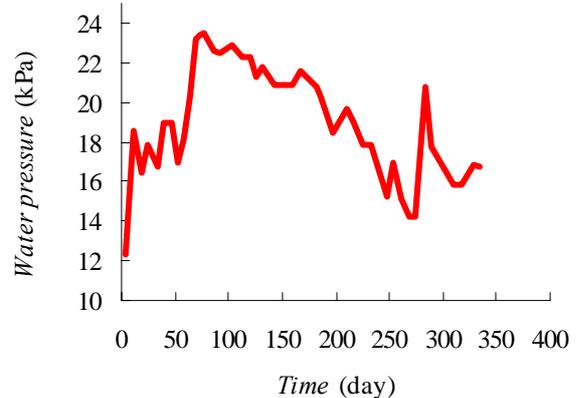


図-12 地下水圧の経日変化

ひずみは、測定開始から約 50 日後の地下水圧上昇に伴い増加している。その後地下水圧は減少するが、ひずみは継続して増加している。この状態は、間隙水圧載荷試験の最終間隙水圧段階の挙動に似ており、破壊に近い状態であると考えられる。しかし、測定約 250 日後にはひずみは安定に向かっている。これは、最初に水圧が上昇した後、降雨がほとんどなく地下水圧が低下したことに加えて、排水工の施工が完了したためである。しかしながら破壊に近い状態であったことは明らかであるため、ひずみと地下水圧の接線関係および割線関係における骨格変形係数を調べた。その結果をそれぞれ図-13 および図-14 に示す。

接線骨格変形係数は、プラスマイナス問わずに上下に大きく変動しているため傾向がつかみにくく、複雑な挙動を示す実地盤への適用は難しいと考えられる。一方、割線骨格変形係数は次第に減少しゼロに向かう傾向を示しており、間隙水圧載荷試験結果と同様の傾向を示している。このことから、割線骨格変形係数により実地盤の挙動を分析できるといえる。しかしながら、複雑に変動する実際現象を正確に表現するには至っていないため、今後更なる検討が必要である。

9. クリープ的挙動

間隙水圧載荷試験にて、クリープ挙動と似た挙動が確認された。その結果を図-15 に示す。試験条件は、過圧密比 2.0 である。クリープ挙動では 1 次クリープ開始点にて軸ひずみ速度が急増する (図-7) が、間隙水圧載荷試験結果では軸ひずみ速度が下に凸のカーブを描く挙動を示している。そこで間隙水圧載荷試験から得られたクリープ挙動と似た挙動をクリープ的挙動と定義し、軸ひずみ速度と時間の関係から特徴的な 3 つの区間に分類した。その分類を図-16 に示し、軸ひずみ速度が増加傾向を示す区間 (1st behavior) 軸ひずみ速度が一定である区間 (2nd behavior) 軸ひずみ速度が急増し供試体が破壊に至る区間 (3rd behavior) と定義する。

クリープ的挙動の実地盤への適用性を確認するために、2nd behavior の定常軸ひずみ速度と破壊時間の関係を調べた。その結果を図-17 に示す。図には長岡粘土の試験結果、

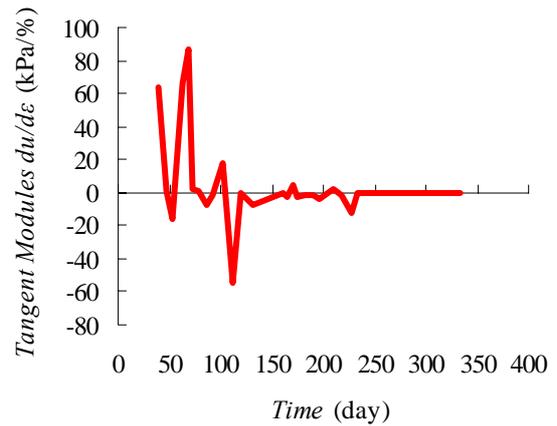


図-13 接線骨格変形係数の経日変化

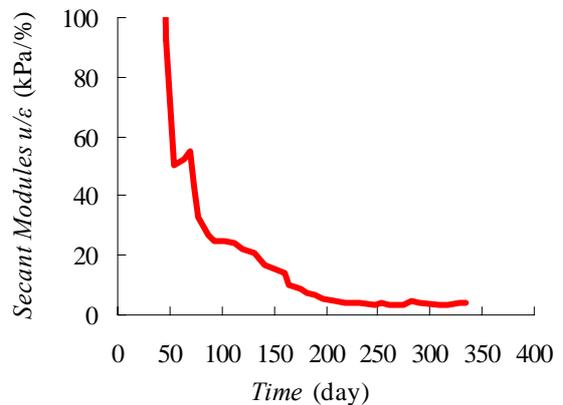


図-14 割線骨格変形係数の経日変化

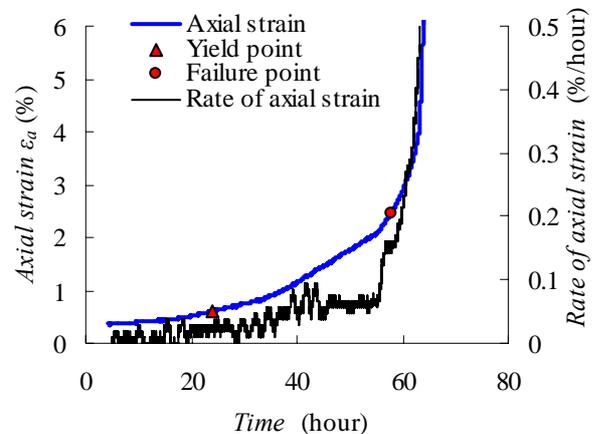


図-15 クリープ的挙動

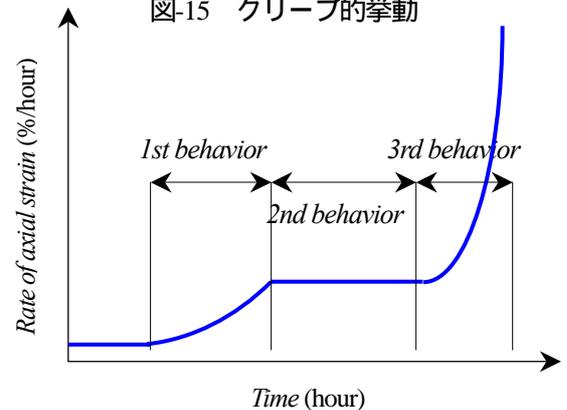


図-16 クリープ的挙動の分類

実際の地すべりデータの結果、およびクリープ破壊試験結果を基に同関係を定式化している齊藤の方法による予測破壊時間を併せて示している。

地すべりデータは、間隙水圧載荷試験結果と同じライン上にプロットされている。このことから間隙水圧載荷試験により確認されたクリープ的挙動は、クリープ破壊試験により定義されているクリープ挙動よりも実際の挙動に近い挙動を示しているといえる。

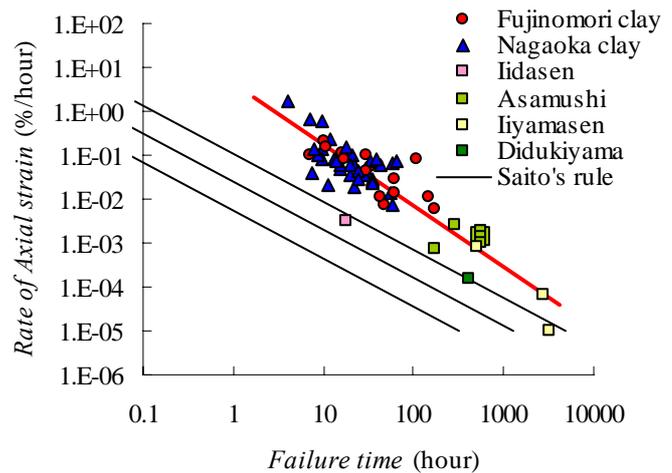


図-17 定常軸ひずみ速度と破壊時間の関係

10. クリープ的挙動の発生機構に関する考察

間隙水圧載荷試験より得られたクリープ的挙動

は水の移動に伴う進行性破壊により生じると考えられるため、より実地盤に近い挙動を示していることが図-17にて確認された。従って、クリープ的挙動の発生機構の解明が地すべりの時間依存性挙動の解明につながると考えられる。そこで、土水連成挙動の視点からクリープ的挙動の発生機構について考察を試みる。

骨格変形係数を用いると単位時間あたりのひずみ増分は次式で表される。

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{du/d\varepsilon} \cdot \Delta u$$

ここで、 $du/d\varepsilon$ は骨格変形係数、 Δu は単位時間あたりの間隙水圧増分である。従って、単位時間あたりのひずみ増分は骨格変形係数の逆数と単位時間あたりの間隙水圧増分の関係により決定される。ひずみ速度が一定である *2nd behavior* は両者の関係がバランスを保っている状態であり、*1st behavior* および *3rd behavior* は両者のバランスが崩れた状態であると考えられる。この関係を用いることで、土水連成挙動の視点から地すべり現象を表現することが可能であるといえる。

11. 結論

土水連成挙動に着目して間隙水圧載荷試験を行った結果、以下の知見が得られた。

1. ひずみと間隙水圧の比を有効応力に関する骨格変形係数と定義した。骨格変形係数により地すべり挙動の分析が可能であることを確認できた。
2. クリープ的挙動を骨格変形係数を用いることで表現することができた。
3. 間隙水圧載荷試験結果より得られた *2nd behavior* の定常軸ひずみ速度と破壊時間の関係が地すべりデータとほぼ一致した。

[参考文献]

- 1) 吉田宏一、宮田善郁、清住真、大塚悟；間隙水圧の載荷による粘性土の時間依存性挙動、第36回地盤工学研究発表会講演集、pp.955-956、2001
- 2) 浅岡顕、中野正樹、野田利弘、蒲池孝夫；滑っては止まり、滑っては止まりを繰り返す超過圧密粘土の進行性破壊、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.79-80、1996
- 3) 山田剛二、渡正亮、小橋澄治；地すべり・斜面崩壊の実態と対策、山海堂、1977