

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	柴崎 達也
論文題目	スメクタイトを含む粘土の残留強度特性に及ぼす温度の影響に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本研究は、日本海側の中山間地等において晩秋から融雪期にかけて様々なタイミングで移動を開始する再活動型地すべりの機構検討を目的に、浅層地温の季節変動が斜面安定に影響を及ぼす可能性に着目した。従来、土の残留強度に及ぼす温度の影響に関する研究は少なく、低塑性な粘土での実験に限定されていた。日本国内の新第三紀の堆積性軟岩や火山地帯などの緩斜面で発生する地すべりでは、すべり面粘土にスメクタイトが含まれている事例が多い。本研究では、スメクタイトを含む高塑性な粘土の残留強度特性に及ぼす温度の影響について、力学実験および試料観察をもとに検証した。</p> <p>新潟県上越市の地すべり地より不攪乱状態で採取したすべり面試料について、温度環境を変化させながら繰り返し一面せん断試験を実施した。その結果、温度低下に伴いすべり面のせん断強度が低下し、せん断抵抗角が低減することを明らかにした。また、温度低下によるクリープ変位の開始・進行を検証する実験を行ったところ、停止状態から変位が開始し、冷却中緩慢に変位が継続する挙動を確認した。また、リングせん断試験機を用いて、多数の土質材料について残留強度特性に及ぼす温度の影響を調べた。一連の実験結果より、スメクタイトを多く含む粘土ほど、せん断強度の温度依存性が顕著なことを明らかにした。また、低温環境で強度低下する挙動は、せん断速度が低速条件でのみ認められた。その機構検討のため、残留強度状態にあるせん断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、低速条件ほどせん断面が滑らかであり、粘土粒子が強く配向していることを確認した。スメクタイト粒子表面のマイクロ領域に発揮される摩擦力が低温環境ほど低下することを明らかにした先行研究を踏まえて、せん断面全体として低温環境ほど強度低下する特性が発現するメカニズムを提示した。</p> <p>加えて、残留強度状態での詳細なせん断挙動に着目し、スメクタイトの交換性陽イオンによって、せん断挙動が異なることも明らかにした。Caスメクタイト主体の粘土は、残留せん断状態において高温環境ほどスティックスリップ現象を起こしやすいことが判明した。Caスメクタイトは底面間隔の膨張に上限があり、せん断面では凸部 (アスペリティー) の接触域と水膜が発達する非接触域に分かれやすく、過圧密化したアスペリティーに応力集中が起きやすくなる。スティックスリップ現象が高温ほど顕在化する理由として、アスペリティーの弾性が高温ほど高まる機構により説明した。</p> <p>スメクタイトは他の粘土鉱物に比べて特異に小さな残留強度特性を示すことが知られている。本研究でその温度依存特性を詳細に調べた結果、低温ほど強度低下する特性が明確となった。つまり、寒候期に浅い地すべりが不安定化する要因の一つとして、すべり面における季節的な地温低下が関与する可能性が示唆される。地温は緩やかに季節変動を起こし、かつ表層から深部に向かうほどタイムラグを生じるため、寒候期全般長期にわたって浅い地すべりの発生ポテンシャルを上昇させる効果が予想できる。地温の季節変動は、浅層に位置するすべり面部位ほどその影響が大きく、地すべり土塊のサイズや形状によって斜面安定に及ぼす影響度は異なるため、寒候期の初期から後期にかけ多様なタイミングで発生する地すべりに影響している可能性を指摘した。また、日本国内では数多くの活火山を抱えており、その火山体周辺にもスメクタイトを含む変質岩体が大規模な地すべりを起こしている事例が多いことから、地熱活動の長期変動などにも着目する必要性を論じた。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

日本有数の地すべり多発地帯として知られる新第三紀の堆積性軟岩が分布する新潟県などでは、融雪期に発生する地すべりの他、晩秋から初冬の時期に移動を開始する地すべりや、厳冬期に移動が活発化する地すべりがある。寒候期全般に様々なタイミングで発生する地すべりの要因については、地すべりの動態観測データが蓄積されてきた現在でも未解明な点が多く、地すべりの発生時期や動態の予測の面で、その機構解明が防災上課題となっている。

申請者は、寒候期初期に発生する浅い地すべりの発生誘因として、浅層地温の季節変動が関与する可能性に注目した。新潟県伏野地すべり地にて、ボーリング調査によりすべり面を含んだ不攪乱試料を採取し、せん断強度の温度依存性を確認した。すべり面粘土にはスメクタイトが豊富に含まれており、繰り返し一面せん断試験による実験の結果、低温環境ほどすべり面強度が低下し、緩速なクリープ変位を誘発することを明らかにした。加えて、リングせん断試験機を用いて、全国各地の地すべり地より採取した数多くの粘土を用いて残留強度の温度効果を調べた結果、スメクタイトに富む粘土ほど温度依存性が顕著であり、温度変化の効果は、粘着力よりもせん断抵抗角に影響することを明らかにした。また、温度依存特性がせん断速度によっても変化することも見出した。せん断面の観察から、低速条件ほどせん断面が平滑で、板状のスメクタイト粒子の配向が顕著である実態を確認した。スメクタイト粒子の層面に沿うマイクロ領域での摩擦が低温ほど低下することを明らかにした先行研究を踏まえ、せん断面において層面に沿った粒子配向が卓越する低速条件では、低温環境ほど強度低下するとするメカニズムを提示した。

申請者はまた、スメクタイトを含む多様な粘土の低速せん断時の残留強度特性を調べていく中で、スティックスリップとよばれるせん断挙動を発現する試料の存在にも注目した。スメクタイトを含んだ多くの粘土の力学データと試料の物理・化学・鉱物学的な特性を整理した結果、Caスメクタイトに富む粘土に特徴的にスティックスリップ現象が起きやすいことを見出した。その発現機構を検討するため、せん断面の走査型顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡による観察や表面分析を行った結果、Caスメクタイトは、せん断面の凸部（アスペリティー）に応力が集中しやすい面環境を整えやすいことを明らかにした。Caスメクタイトに富む粘土の残留強度は、高温環境ほど強度上昇することに加え、スティックスリップ現象も顕在化する特性を有している。温度に依存して力学的な不安定性が増大する要因として、アスペリティーの弾性が温度に応じて変化するメカニズムを提示した。

スメクタイトは様々な鉱物の中でも特異に小さな残留せん断抵抗角を発現することで知られる。緩斜面で緩慢に再活動を繰り返すような地すべりでは、地層中のスメクタイトの存在が素因となっている事例が多い。本研究によって、スメクタイトに富む粘土の残留強度が温度に依存し、低温環境で強度低下する特性が明確となった。この知見により、寒候期に浅い地すべりが不安定化する要因として、すべり面深度における季節的な地温低下が影響する場合もあることが示唆された。また、火山地帯で発生する地すべりの長期安定性を議論する上でも、地温環境の観測の重要性が問題提起された。

本研究の成果は斜面変動の科学に重要な知見となるものであり、地すべりの発生時期の予測や対応を考える上で新たな視点を与えるものと評価できる。よって、本論文は、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。