

京都大学大学院 理学研究科
地球惑星科学専攻 地球物理学分野 博士論文

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

平成 31 年 1 月

柴崎 達也

要 旨

日本有数の豪雪地帯かつ地すべり多発地帯として知られる日本海側の山間地では、融雪期に発生する地すべりの他、晩秋や初冬に移動を開始する地すべりや、厳冬期に活発化する地すべりが多数報告されている。融雪期以外の寒候期全般に地すべりが発生する要因については未解明な点も多く、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の課題となっている。緩慢な移動を繰り返す再活動型地すべりが多発する地質体として、新第三紀の堆積性軟岩や火山地帯の火山性軟岩の分布地域が挙げられる。これらの表層地盤の特徴として、膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを含む高塑性な粘性土で構成される場合が多い。従来、スメクタイトと水との混合分散系では、pH や溶存イオン種、その濃度などの化学的特性に加え、温度環境によってもレオロジー挙動が大きく変化することが知られている。一般的に、深度 10m 以浅の表層地盤では、地温の季節変動を伴う。そこで本研究では、スメクタイトを含む地層で発生する浅い地すべりが寒候期初期に不安定化する要因として、季節的な地温変動が関与している可能性に着目した。室内実験により、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を検証し、地すべり機構の検討を試みた。

新潟県上越市の伏野峠地すべりにおいて、残留強度状態にあるすべり面の不攪乱試料を採取する機会を得た。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、スメクタイトを含む地すべり粘土や商用粘土など多数の土質材料を用いてリングせん断試験を実施し、残留強度特性に及ぼす温度の影響を調べた。Ca ベントナイトを用いた長期の実験から、せん断強度が温度変動に追従し緩やかに変化することを明らかにした。一連の実験データより、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が明らかとなった。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。残留強度状態にある粘土のせん断面や、地すべり面の表面を観察すると、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性状が確認された。原子間力顕微鏡を用いた先行研究によると、配向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は、低温環境ほど低下することが報告されている。粒子配向の進んだ残留状態にあるせん断面では、粒子の層面に沿う摩擦現象が卓越し、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と考えられた。一方で、せん断速度が速まると、せん断面では粒子の配向が乱され、低温時に強度低下する特性が失われると考察した。

残留強度状態での詳細なせん断挙動に着目すると、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なった。Ca スメクタイト主体の粘土は、高温環境ほど、残留せん断状態においてスティックスリップ（固着すべり）と呼ばれる小刻み

なせん断応力の微変動を起こしやすい。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ことにより説明できる。

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している可能性が示唆される。一般的に、地すべりの発生に影響する間隙水圧変動は、降雨や融雪のイベントで急上昇しては消散するため、短期的な問題として地すべりの積極的な誘因として作用することが多い。一方、地温はゆっくりと季節変動を起こし、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。また、地温の季節変動は、地すべり縁端部浅層に位置するすべり面部位ほどその影響が大きく、地すべりのサイズや形状により斜面安定に及ぼす影響度は異なる。そのため、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がある可能性がある。本研究により得られた成果は、地すべりの発生時期の予測や被害軽減や安定化の対応を考える上で、地すべりを専門とする研究者のみならず、斜面防災に関わる行政担当者・技術者にも、問題提起や新たな視点を与え、斜面変動の科学に新しい知見となるものである。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は数多い。そのような斜面の長期安定を考える上でも、地熱活動の長期変動などにも着目する必要性がある。

Experimental investigations of the effect of temperature on residual shear strength characteristics of smectite-bearing soils

SHIBASAKI Tatsuya

Abstract

In the Hokuriku District of north-central Japan, well-known for heavy snowfall and landslides, many slow-moving landslides occur and reactivate during the cold season from late autumn to early spring. However, it is not yet clear why landslides are able to activate anytime during the cold season. To predict initiation timing and behavioral characteristics of such slow-moving landslides, the mechanisms driving its occurrence must be investigated from several points of view. In Japan, reactivated landslides are distributed on gentle clayey slopes in specific geological settings such as Neogene soft sedimentary rock areas and hydrothermally altered rock areas around old and active volcanoes. These strata are typically composed of high-plasticity soils such as the swelling clay, smectite. It is known that the rheological behavior of smectite suspensions depends on environmental factors such as pH, dissolved ions, suspension concentrations, and temperature. In general, ground temperatures near the surface, that is, less than 10 m deep, fluctuate seasonally; the author hypothesized that ground temperature influences the stability of landslides occurring early in the cold season. In this study, using a laboratory experiment, the effects of temperature on the residual shear strength of smectite-bearing soils were thoroughly investigated.

Undisturbed slip surface soils were collected from the Busuno Landslide, located in Joetsu City, Niigata Prefecture. The results of temperature-change box shear tests revealed that shear strength and frictional angle decreased with decreasing temperature. In addition, results of shear stress-controlled experiments showed that a decrease in temperature induced creep-like shear displacement. To understand the effect of temperature on the residual strength of smectite-bearing soils, ring shear tests were performed on various soils with varying smectite fractions. Long-term temperature-change experiments performed on Ca-bentonite showed that residual shear strength changed linearly and positively with temperature. Thus, the series of these experiments revealed that the residual strength of soils with high smectite content is very sensitive to temperature. It also became clear that cooling-weakening was typical under low shear rate conditions. Observations on experimentally-produced shear and natural slip surfaces showed that shear surfaces that form under low

shearing rates are very shiny and smooth; this implies that clay particles are strongly oriented along the shear surface. According to a study where atomic force microscopy was used, the frictional force acting on the surface of oriented smectite particles decreases with decreasing temperature. Under residual strength conditions, lamination-parallel slips of smectite particles prevail at the shear surface, leading to cooling-weakening. However, clay orientation is disturbed at high shearing rates, resulting in cooling-strengthening.

Another interesting finding of this study is that the ring shear behavior of smectite-bearing soils depends on exchangeable cations. Stick-slip behavior is typically observed for clayey soils enriched with Ca-smectite, the basal spacing of which cannot expand over 2.0 nm. Residual shear surfaces of Ca-smectite-rich soils are characterized by two distinct surface areas: a strong-contact area with over-consolidated asperities and a non-contact area with a water film layer. On the shear surface, stresses are assumed to be concentrated on the fronts of asperities. Stick-slip behavior is seen at elevated temperatures, probably because the elasticity of asperity-forming clays increases with increasing temperature.

Among clay minerals, smectite shows extremely low residual shear strength levels. This study has clearly revealed that the shear strength of smectitic clay decreases with decreasing temperature. This finding implies that seasonal fluctuation in ground temperature can influence slope instability, especially for shallow, slow-moving landslides. In general, pore water pressure increases immediately after heavy rainfall and snowmelt events, leading to the aggressive triggering of landslides within a short timescale. In contrast, the ground temperature fluctuates slowly over the seasonal and annual timescale, resulting in increased landslide potential throughout the cold season. Further, seasonal variations in ground temperature are large for shallow parts of the slip surface located on the margins of the sliding mass. The effect of this variation on slope stability depends on the three-dimensional size and shape of the landslide body, implying that landslides are likely to occur anytime in the cold season. The series of results in this study provide new insights to landslide science and landslide communities including researchers, engineers, and government administrators involved in landslide surveys and mitigations. In addition, these temperature-dependent soil properties, specific characteristics of smectitic clays, could also be important for the investigation of large landslides occurring around active and old volcanoes, because smectite is widely distributed in hydrothermally-altered rock areas.