リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較

Comparison of microscopic structure in shear plane of the ring shear test and slip surface

村尾英彦^{a)}, 釜井俊孝^{b)}, 野坂 徹^{a)}

Hidehiko MURAO, Toshitaka KAMAI and Toru NOZAKA

Abstract

Soil has a structure in which various particles are arranged as a result its geological history. Therefore, by determining the current structure of the soil, it is possible to estimate the stress history of the soil and to predict how it will behave. In particular, the orientation of clay particles is a notable feature in landslide clay that has experienced large deformation. Accordingly, the particle orientation should be useful for estimating movement direction, and stress state. In this study, with the aim of deepening understanding of the microscopic structure of landslide clay, the formation process of landslide clay in the landslide zone of a Tertiary formation was investigated by using the ring shear test to compare the shear plane and the slip surface of an undisturbed specimen. Our investigation found that (1) the microscopic structure of shear planes in a residual strength state due to large deformation exhibits slickensides and striations, (2) the shear layer is formed from a folium of peds arranged parallel to the shear plane, and (3) the shear layer has a fully oriented structure differing from that of the dispersed structures in the local area.

Key words : landslide, slip surface, failure, residual strength, soil structure

和文要旨

土は、土粒子が過去に受けた履歴の結果として、配列した構造を持っている。よって、現在の土の微視的構造を知ることにより、その土が経験した応力履歴および、今後の挙動を推定可能であると考えられる。特に、大変形を経験した地すべり粘土においては、粘土粒子の配向が顕著である。よって、地すべり粘土の配列程度から、変動方向や応力状態の推定ができる可能性が高い。本研究では、地すべり粘土の微視的構造に関する理解を深めることを目的として、新第三系の地すべり粘土の生成過程に関する考察を行った。その検討から、大変形を経験し、残留強度状態にあるせん断面の微視的構造の特徴として、鏡肌を呈し、条線が見られること、せん断面周辺には、せん断面と平行にベッドが配列した構造を持つ薄層が生成され、せん断層を形成していること、せん断層は、完全配向構造となっており、周辺の分散構造とは異なる構造を持つことが明らかとなった。

キーワード : 地すべり, すべり面, 破壊, 残留強度, 土の構造

1. はじめに

地すべり粘土は、すべり面付近に発達した、地すべり土塊の変動に決定的な役割を果たす弱層である。新第三系の地すべりなどにおいて確認されることが多く、一般的に、数mm～数cmの厚さを持つとされている¹⁾。すべり面においては、鏡肌が認められることが多く、X線回折を行うと、母岩の性質に依存した粘土鉱物が多く含まれている。特に新第三系の地すべりにおいては、主要粘土鉱物としてスメクタイトが多く含まれていることが知られている。地すべり粘土は、変位量が増加するに伴い、擦痕状、粘土混じり礫状、礫混じり粘土状、粘土状という変遷を示し、粘土分が増加する²⁾。また、変位の増加に伴って、強度は完全軟化強度から残留強度へと低下する。日本国内の新第三系の再滑動型地すべりは、大変形を経験しているものが多いことから、すべり面の強度は、大半が残留強度状態にあると考えられている。また、残留強度状態にある、多数の地すべり面の強度に関する研究³⁾や、すべり面の地質的特徴及び、構造物性、強度等の実態について整理された報告⁴⁾が存在し、研究が進め

られている。

主として2次元断面安定解析が行われる実務においては、残留強度状態にあるすべり面の、強度定数として、リングせん断試験より得られた内部摩擦角 ϕ_i と、滑動状態から設定した安全率から、調査時の情報から評価することが困難な、すべり面のせん断抵抗力以外の抵抗力(地形や、地すべり頭部、側部、末端部の縁端効果など)を含めた、安定解析用の粘着力 c_{inv} (この値は、土粒子と吸着水の物理化学的作用による粘着力とは異なるパラメータ)を逆算する方法⁵⁾などが、経験的に有効な手法として提案されている。

一方で、地すべり粘土の生成過程や、粘土の微視的構造と、力学的特性の関係には、未だ不明なことが多い。これらの関係を解明するには、地すべり粘土を微視的な視点から考察し、構造の変化と応力状態の対応を明らかにすることが必要である。

本研究は、地すべり粘土の微視的構造に関する理解を深めることを目的として、新第三系の地すべり地で採取した、不攪乱試料中の地すべり粘土の微視的構造と、リングせん断試験におけるせん断面の微視的構造を比較し、地すべり粘土の構造と力学的特性に関する考察を報告するものである。

* 連絡著者 / corresponding author

a) 株式会社村尾地研
Murao Chiken Co., Ltd
〒939-8262 富山市塚原150
150 Tsukahara, Toyama city, Toyama Prefecture, Japan
b) 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2. 試料について

試料を採取した地すべり地周辺の地質は、新第三系中新統砂岩泥岩互層で、 $10\sim30^\circ$ 程度の傾斜を持つ流れ盤構造の斜面である。地すべりは融雪期や、豪雨に伴い滑動を繰り返す再滑動型地すべりである。砂岩は、凝灰質で泥岩や凝灰岩粒を一部に含み、泥岩は緻密で固化している。また、新第三系の泥岩が主体であることから、風化耐性が低く、地すべり地周辺での露頭は風化し、容易に剥落する状態であるものが多い。

地すべりブロックにおける動態観測、コア観察、地下水検層結果より、深度10.0m地点の風化泥岩と強風下泥岩の境界にすべり面の存在を判定した。この地点で採取した不攪乱試料において確認したすべり面を図-1に示す⁵⁾。すべり面には鏡肌が形成されており、粘土化した層の厚さは2mm(すべり面を挟んで4mm)程度である。また、目視において、地すべりの移動方向に平行な条線が確認でき、親指の爪が貫入可能な程度の硬さである。

3. 物理的性質

リングせん断試験に用いた試料には、図-2に示すように、すべり面を含んだ上位30cm区間の強風化泥岩を

図-1 すべり面⁵⁾
Fig. 1 Slip surface⁵⁾

図-2 試料採取箇所⁵⁾
Fig. 2 Sampling locations⁵⁾

用いており、既報⁵⁾においてすべり面上位の風化泥岩部分より採取した試料を混合した試料である。試料の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-3に示す。試料の98.5%はシルト粒径($75\mu\text{m}$)以下で、50%は粘土粒径($5\mu\text{m}$)以下である。また、塑性指数 I_p が56.8%と高塑性を示し、活性度 $A>1.25$ となることから、有機コロイドを含む活性粘土(スメクタイト質土)に分類される。なお、物理試験は、リングせん断試験用の供試体を作成する前の、十分に攪拌した試料を用いて実施しており、各上載圧毎に作成した供試体の代表的な値である。

4. 力学的性質

すべり面粘土の強度定数を求めるために、リングせん断試験を実施した。図-4にせん断応力 τ -せん断変位 D 関係を、図-5にクーロンの破壊規準を示す。なお、リングせん断試験に用いた供試体は、以下の手順で作成

図-3 リングせん断試験試料の粒径加積曲線

Fig. 3 Grain size accumulation curve of the ring shear test samples

図-4 リングせん断試験結果
Fig. 4 Ring shear test results

表-1 すべり面粘土の物理的性質

Table 1 Physical properties of the slip surface clay

液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_p (%)	細粒分含有率 F_c (%)	活性度 A	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
105.3	48.5	56.8	98.5	1.42	2.60	1.5	48.5	50

した。

1. 採取した粘土に、蒸留水を加えながら425 μ mのふるいで裏ごしを行う。
2. 含水比200%とした上で十分に攪拌する。
3. 一次元圧密条件下で、せん断時の上載圧で予圧密を行う。
4. 圧密が進行し、24時間の垂直変位がゼロとなった時点で圧密完了とする。
5. 外径150mm、内径100mm、高さ20mmの中空円筒型に整形し、試験機にセットする。

なお、4.の圧密完了条件は、圧密試験で用いられる、3t法による圧密打ち切りを十分に満たしている。

試験機は、ピシヨップ型試験機⁶⁾に改良を加えたもの⁷⁾を使用している。試験条件は、上載圧一定、ひずみ制御方式、せん断速度0.015mm/minおよび、排水条件としている。また、供試体は正規圧密粘土 (OCR=1.0) である。

表-2に、リングせん断試験より得られた、完全軟化強度の強度定数 (c'_{fs} , ϕ'_{fs}) および、残留強度の強度定数 (c'_r , ϕ'_r)⁸⁾を示す。残留強度の内部摩擦角 ϕ'_r ($^{\circ}$)は、既報⁵⁾においては、 $\phi'_r=4.42, 4.66, 4.78(^{\circ})$ となり、今回の試験でも、ほぼ同様な値が得られている。完全軟化強度、残留強度を求めた際の相関係数は、完全軟化強度で0.99、残留強度で0.97と、共に良好である。

試験より得られた、残留強度状態における粘着力は、 $c'_r=1.66$ kPaとなっている。理論的には、残留強度状態となった供試体は、せん断面を境界として分離している

図-5 Coulombの破壊規準
Fig. 5 Coulomb's failure criterion

表-2 リングせん断試験による強度定数

Table 2 Strength parameters from the ring shear test

完全軟化強度		残留強度	
c'_{fs} (kPa)	ϕ'_{fs} (degree)	c'_r (kPa)	ϕ'_r (degree)
13.15	11.85	1.66	4.94

ことから、粘着力はゼロであると考えられる。よって、今回得られた、極めて小さい値である $c'_r=1.66$ kPaは、試験機の摩擦等が原因で生じた系統誤差であると考ええる。

残留強度の定義は、排水せん断あるいは、定圧せん断において、せん断抵抗がピーク値を超え、漸次低下して、究極的な定常せん断状態に達した時の値である。リングせん断試験において、残留強度に至っているかを判断するには、上記の定義を満たし、強度がほぼ一定の値に収束した際とし、今回の検討では、せん断変位 5 mm に対して、せん断応力の変動幅が 1 kPa 以内に収束した場合とした。これらは、垂直応力の差異に関わらず同様である。

多くの地すべりに見られる、すべり面の大変位を再現するために、垂直応力 $\sigma'=200$ kPaの条件下において、せん断変位 $D=1000$ mmを経た、供試体のせん断面（以下、せん断面と記す）を図-6に示す。図-6において、せん断面にはすべり面（図-1）と同様に、鏡肌が形成されている。また、せん断方向には、同心円状の条線を確認することができる。せん断面と、不攪乱試料中のすべり面（以下、すべり面と記す）を目視で比較すると、光沢や色調は同程度である。一方で、条線の数に関しては、せん断面の方が多い。

5. 主要粘土鉱物の評価

鉱物組成、粘土鉱物を同定するために、粉末X線回折法による分析⁹⁾を行った。分析方法は、不定方位回折による全組成鉱物の同定である。図-7に地すべり粘土（図-1に示したすべり面より試料採取）のX線回折チャートを、図-8にリングせん断試験後（図-6に示したせん断面より試料採取）の、供試体せん断面のX線回折チャートを示す。なお、分析機器には(株)リガク製ガイガーフレックスを用いた。回折条件はCu管球対陰極 (35 kV, 15mA) X線源、走査速度 $2.0^{\circ}/\text{min}$ 、サンプリング幅 0.01° 、走査範囲 $5 \sim 70^{\circ}$ である。

図-7,8より、主要粘土鉱物は、ス멕タイトであり、主要な造岩鉱物は、石英であることがわかる。このこと

図-6 せん断面 (せん断変位 $D=1000$ mm)
Fig 6 Shear plane (shear displacement $D=1000$ mm)

は、土質試験結果において、活性粘土に分類されたことと一致する。なお、X線回折試料には、すべり面とせん断面の表面を、厚さ1mm程度に削り取り、自然乾燥させたものを用いている。

これらの結果を比較すると、すべり面、せん断面の主要粘土鉱物および、造岩鉱物は一致している。せん断強度を支配するスメクタイトを示す $2\theta \approx 6^\circ$ の回折強度が同程度であることから、両試料のスメクタイト含有量は、ほぼ同程度であると考えられる。このことから、リングせん断試験の供試体のせん断面が、地すべり粘土と同様の鉱物組成を持っており、供試体のせん断面が地すべり面を再現できていることを確認した。

6. 走査性顕微鏡による微視的構造の観察

すべり面、せん断面および、せん断面側部に関して、走査性顕微鏡（以下、SEMと記す）を用いた観察を行った。試料は、図-9に示すように、5mm四方、厚さ1mm程度に整形したものを、自然乾燥させた後、金蒸着を行った。

6.1 粘土の構造に関して

粘土の微視的構造は、板状の粘土粒子が単独で存在することはほとんどなく、程度の差はあるものの、粒子の凝集体によって形成されている。さらに、粘性土における接触は結合水を含めた固体接触であり、ランダムな場合でも水中に遊離して存在するとは考えられない。よって、この凝集体を力学的取扱いの最小単位とみなすことができる。

以下の議論では、松尾ら¹⁰⁾の提案に基づき、表-3に示すように、粘土の構造を構成する基本単位の用語として、凝集体についてはペッドを、その周りの間隙については、ポアを用いる。

図-7 すべり面粘土のX線回折チャート
Fig 7 X-ray diffraction chart of slip surface clay

図-8 せん断面のX線回折チャート
Fig. 8 X-ray diffraction chart of shear plane

外力によってペッドは変形もしくは細粒化し、ペッド内の間隙（主にサブマイクロポア）は、物理化学的な力の作用の平衡に依存するものとする。ペッド間のポアの変化は、力学的な力の平衡に依存した、ペッドの移動、変形の結果であると考えられる。

上述した基本単位の、配列の程度を表すものとして知られている基本モデル¹¹⁾を図-10に示す。基本モデルは、重力が下方に作用しているものとして、粒子が配列する際の断面を示した模式図である。基本モデルは主に、単

図-9 SEM観察試料作製模式図

Fig. 9 SEM observation sample preparation schematic diagram

表-3 基本単位（ペッド、ポア）の定義¹⁰⁾
Table 3 Denifinition of basic unit (ped and pore)

ペッド (ped)		ポア (pore)	
マクロペッド macro ped	(> 50μm)	マクロポア macro pore	(> 10μm)
メソペッド meso ped	(2 - 50μm)	メソポア meso pore	(1 - 10μm)
マイクロペッド micro ped	(0.1 - 2μm)	マイクロポア micro pore	(0.01 - 1μm)
サブマイクロペッド submicro ped	(< 0.1μm)	サブマイクロポア submicro pore	(< 100Å)

図-10 基本モデル（基本単位の配列程度）¹¹⁾に加筆
Fig. 10 Basic model (degree sequence of basic unit)

一種類の粘土鉱物からなる場合において提案されたものである。自然の粘性土は、多種類の粘土鉱物やシルト分（もしくは砂分）を含むため、基本モデルほど単純ではないが、以下では単純化して、これらの基本モデルに分類して議論を進める。また、先述したように、粘土粒子は単独ではなく、凝集体として存在することから、力学的取扱いの最小単位である、ペッドの配列および配向を表していると考ええる。なお、配向の定義は、構成単位となる粒子が一定方向に配列することである。

6.2 すべり面およびせん断面の観察

すべり面（図-1）を50倍に拡大したものを図-11に、2000倍に拡大したものを図-12に、図-12において、目視観察によって認識が可能なペッドを示したものを、図-13に示す。また、図-6に示したせん断面を、50倍に拡大したものを図-14に、2000倍に拡大したものを図-15に、図-15において、目視観察による認識が可能なペッドを示したものを、図-16に示す。

図-11からは、一定方向（せん断方向）に条線が発達しており、条線に沿った長さ500 μ m程度の亀裂を確認できる。また、所々に30 μ m程度のペッドを確認できる。

図-12,13からは、ペッドが表面を覆い、すべり面と

平行にペッドが配向している様子が観察できる。ペッドの大きさは、2~10 μ m程度のメゾペッドが見られ、さらに細粒化したマイクロペッドや、目視では大きさを認識できない、サブマイクロペッド、サブマイクロペッドが表面を覆っていることを確認できる。また、ポアに関しては、所々に2 μ m程度のメゾポアを確認できる（図-13中の「細粒化したペッド」は最も細粒化したペッドを指す）。

図-13 すべり面（2000倍）のペッド
Fig. 13 Ped at slip surface (2000 times)

図-11 すべり面（50倍）
Fig. 11 Slip surface (50 times)

図-14 せん断面（50倍）
Fig. 14 Shear plane (50 times)

図-12 すべり面（2000倍）
Fig. 12 Slip surface (2000 times)

図-15 せん断面（2000倍）
Fig. 15 Shear plane (2000 times)

図-16 せん断面 (2000倍) のペッド
Fig. 16 Ped at shear plane (2000 times)

図-14からは, せん断方向に条線が発達していることを観察できる。また, 所々に $30\sim60\mu\text{m}$ 程度のペッドを確認できる。

図-15, 16からは, ペッドが表面を覆い, せん断面と平行にペッドが配向している様子が観察できる。ペッドの大きさは, $0.5\sim2.5\mu\text{m}$ 程度のマイクロペッド～メゾペッドが見られ, すべり面と同様に, 目視では大きさを認識できない, さらに細粒化したマイクロペッド, サブマイクロペッドが表面を覆っていることを確認できる (図-16中の「細粒化したペッド」は最も細粒化したペッドを指す)。また, ポアに関しては, 所々に $0.5\mu\text{m}$ 程度のマイクロポアを確認できる。50倍に拡大したすべり面 (図-11) とせん断面 (図-14) を比較すると, 共に, 条線が発達が見られるが, せん断面の方が, 本数が多い。また, すべり面で確認された, 条線に沿った亀裂 (長さ $500\mu\text{m}$ 程度) は, せん断面では確認できない。

2000倍に拡大したすべり面 (図-12, 13) とせん断面 (図-15, 16) を比較すると, ペッドの大きさがすべり面においては, 長軸方向に $10\mu\text{m}$ 程度のものが多いのに対して, せん断面においては, $2\sim3\mu\text{m}$ 程度のものが多く, 比較的小さいことがわかる。また, せん断面では, ペッドの長径軸が配列している方向と, せん断方向が多く of ペッドにおいて, ほぼ一致している傾向がある。一方ですべり面では, この傾向は弱くなる。また, すべり面, せん断面共に, 表面は, マイクロペッドやメゾペッドが配向しており, サブマイクロペッドが表面を覆っていることが観察できる。

6.3 せん断面側部の観察

せん断面側部を50倍に拡大したものを図-17に, 500倍に拡大したものを図-18に, 2000倍に拡大したものを図-19に示す。

図-17において, 右下部分が供試体のせん断面側部にあたる。せん断面に沿って, $80\mu\text{m}$ 程度の厚みを持った層 (以下, せん断層と記す) が生成されていることがわかる。

このせん断面側部をさらに拡大した図-18より, せん断層は, せん断方向と平行に, 複数の扁平なペッドが重

図-17 せん断面側部 (50倍)
Fig. 17 Side of Shear plane (50 times)

図-18 せん断面側部 (500倍)
Fig. 18 Side of Shear plane (500 times)

なった状態にあることがわかる。せん断面の上下ではほぼ同様の構造が生成されると仮定すると, せん断層は, 供試体上下面合わせて, $160\mu\text{m}$ 程度の厚みを持っていると推定される。また, せん断層の構造は, せん断方向と平行な方向に配向した, 完全配向構造であり, せん断層以外の箇所の分散構造とは明瞭に異なる構造を持っていることがわかる。

7. 考察

これまでにも, せん断面の構造に関する様々な研究が行われている。代表的なものとしては, 釜井ほか¹²⁾による, 進行性破壊の伝播に関する観察結果や, 岸本ほか^{13), 14), 15)}による, せん断層の構造解析と, せん断層の透水係数が周囲と比較して大きいことを示した結果, および大河原ほか¹⁶⁾による, 重層化したせん断構造に関する報告などが存在する。また, 微視的構造に着目した先駆的な研究として, 眞弓³⁾は, 残留状態に至るまでのすべり面, およびせん断面の形成過程について考察している。眞弓³⁾の考察の特徴は, せん断の進行に伴って, 分級が生じ, 細粒分がすべり面, およびせん断面に濃集するように運動すると仮定し, 変形の進行に伴って, 粒子が再

図-19 せん断面側部 (2000倍)
Fig. 19 Side of Shear plane (2000 times)

配列するとしている点である。

今回の結果からは、すべり面、およびせん断面において、ペットの配向 (図-12, 13, 15, 16) と、せん断方向と平行に重なりあうように配向した、80 μ m程度の厚みを持つ、せん断層 (図-18) を確認している。これらは、真弓³⁾の示した、粒子の再配列に相当すると考えられる。一方、すべり面、およびせん断面の表面は、メゾベットからサブマイクロベットまでの、様々な大きさのベットを確認することができることや、せん断層側部 (図-18) の観察から、せん断面から離れるに従って、せん断層内で、ペットの大きさ大きくなるように変化する、分級の様相を確認することはできない。

ここで、今回の観察結果と一致するようなメカニズムとして、すべり面、せん断面において、ペットの細粒化 (破壊) という概念を導入すると、力学的な挙動と併せて説明することが可能である。この考察を以下に述べる。

7.1 リングせん断試験における破壊メカニズム

ペットの細粒化 (破壊) によって、強度が低下すると考えると、リングせん断試験における、せん断面付近の微視的構造の変化と強度の関係は図-20に示すように、下記の4ステップからなると考えることが可能である。

1. せん断開始～完全軟化強度時：せん断の開始に伴い、ペットの噛み合わせによる抵抗力が増加する。その際には、ベットの変位および、回転を伴う。これらの量は、極めて微小な量であると考えられる。
2. 完全軟化強度時：ペットの噛み合わせ状態が、せん断応力が最大となる状態になり、せん断面周辺のペットの破壊に必要な強さが完全軟化強度として発現される。
3. 完全軟化強度～ひずみ軟化時：完全軟化強度に達した後に、ペットの細粒化が生じる。その後、せん断の進行に伴い、細粒化したベットが再配列をはじめ。
4. ひずみ軟化～残留強度：せん断変位の増加に伴い、細粒化したペットの配列が進行し、再配向した時点で残留強度状態となる。また、細粒化したベットが配向した、せん断層が形成される。

今回の検討では、図-4中の垂直応力 $\sigma' = 200$ kPaの供試体において、せん断変位 $D = 300$ mm程度で残留強度状態となった後、700mmの変位 (計1000mm) を経たせん断面の観察を行っている。一方で、試料を採取した地すべり地⁵⁾においては、直近の活動時に、周辺道路に亀裂が発生し、現場状況から300-500mm程度の変位量があったと推定される。さらに再滑動型地すべりであることから、累積では数mに及ぶ変位も想定される。よって、現場の状況から推察するに、せん断変位は、すべり面 (図-1, 11-13) の方が大きい可能性が高い。

上載圧に関しては、図-1のすべり面以浅の強風化泥岩およびその上位の崩積土の単位体積重量を17kN/m³と仮定すると、すべり面 (図-1, 11-13) の上載圧は170kPaとなり、せん断面 (図-6, 17-19) の上載圧垂直応力 $\sigma' = 200$ kPaよりも小さい。ここで、せん断変位は細粒化したペットの再配向に対して支配的であり、上載圧はペットの細粒化に対して支配的であると考え、すべり面 (図-1, 11-13) のペットの大きさが、せん断面 (図-6, 17-19) のペットの大きさよりも若干大きいことを

図-20 応力～ひずみ関係と微視的構造
Fig. 20 Relationship between stress-strain curve and microscopic structure

説明可能である。ただし、この事柄に関しては、上載圧の異なるリングせん断試験を実施し、検証することが必要である。

ポアに関しては、すべり面では $2\mu\text{m}$ 程度のメゾポアが存在するが、せん断面では、 $0.5\mu\text{m}$ 程度のマイクロポアとなり、間隙が小さいことがわかる。すべり面および、せん断面においては、ベッドの大きさは、ほぼ均一であり、ベッドの径が大きい状態にあるほど、ポアも大きくなる傾向が見受けられる。

上記の事柄から、粘性土のせん断面における構造(ベッドの細粒化、配列程度)と応力-ひずみ関係、および上載圧には密接な関係がある可能性が示唆された。

7.2 せん断層の構造

せん断層と、それ以外の箇所における構造の差異について、以下に考察する。図-18,19の目視観察より、せん断層は、ベッドがほぼ一定方向に配列した完全配向構造であり、せん断層以外の箇所は、分散構造となっていることがわかる。供試体は、含水比200%のスラリーを十分に攪拌した後に圧密を行なっているため、スラリー状態ではランダム構造もしくは、綿毛構造であったと考えられる。その後の予圧密によって、ベッドが幾分、配列した分散構造となる。せん断によって、せん断面付近では、ベッドの微小な変位および、回転が生じるものの、破壊までは分散構造が保たれていたと考えられる。破壊すなわち、ベッドの細粒化後には、細粒化したベッドの再配列が進み、分散構造から完全配向構造へと移行すると考えることができる。残留強度状態となった時点では、せん断面から一定区間(供試体においては、せん断面を挟んで $160\mu\text{m}$ 程度)が完全配向構造となり、せん断層が形成されたと考えられる。このことは、図-20に示すように、応力-せん断変位曲線の傾きの変化は、せん断面周辺の構造の変化に伴って生ずると解釈することができる。ただし、今回の検討では、圧密後の供試体の構造や、せん断に伴う微視的構造の変化を観察可能なSEM画像等は得られておらず、残留強度状態からの推測である。よって、今後は、せん断の進行に伴う微視的構造の連続的な変化を確認できるような情報を得た上で、議論を進める必要がある。また、ベッドとポアは3次元の構造を持っていることから、粘性土の微視的構造と力学的特性との対応を検討するには、3次元構造の変化に関して検討を進める必要がある。

8. おわりに

粘土は、種々の粒径を持った粘土粒子が、過去に受けた物理化学的作用の結果として凝集し、それらが配列した構造を持っている。これらの、微視的な構造変化と力学的な特性の関係性には不明なことが多い。特に、せん断面は、強度に対して支配的であることから、せん断面の微視的な構造変化に関する検討を行うことは、粘土の破壊特性を把握することは勿論のこと、弾塑性体として

の取り扱いに、微視的な構造変化の及ぼす影響を取り込むことにも繋がると考える。しかし、これらの問題に関して、実際の問題に適用できるような検討は、行われていないのが現状である。よって、今後は、地すべり粘土の生成過程や、微視的な視点からの、粘性土の破壊メカニズムを解明し、巨視的(ここでは、要素試験レベルを指す)な視点からの、力学的特性との関連を明らかにしていく必要があると考える。

現在の粘土の構造を知ることによって、過去にその粘土が経験した応力履歴や、今後の挙動を、ある程度推定することが可能になると考える。今回の検討より、すべり面粘土においては、粘土粒子の凝集体であるベッドの配列が顕著であり、配列程度から変動方向、応力状態の推定ができる可能性が高いことが示唆された。

特に、せん断面側部の微視的構造からはベッドの配列状態が、完全配向状態にあれば、残留強度状態となっており、配列が進行中で、完全配向状態には至らない状態にあれば、完全軟化強度以下、残留強度以上の応力状態にあると推定することができる。

今回の検討から、残留強度状態にあるすべり面粘土の微視的構造の特徴がある程度明らかとなったものの、せん断変位の増加に伴う、ベッドの変位、回転、破壊後のベッドの細粒化、配列等に関しては、今後、SEM画像の画像解析等による定量評価手法を確立する必要がある。

今回の検討から明らかとなった事柄を、以下に列挙する。

1. すべり面と、リングせん断試験後の、せん断面においては、共に条線が見られ、表面のベッドは、配向している。しかし、条線の数に差異が認められる。
2. 残留強度状態にあるせん断面周辺を、側部から観察すると、せん断面と平行な方向にベッドが配向した構造を持つ。配向したベッドは、複数の薄層が重なり合う構造を持ち、 1000mm のせん断変位によって、せん断面を挟んで $160\mu\text{m}$ 程度の厚みを持つ、せん断層を形成している。
3. せん断層は、周辺の分散構造とは明瞭に異なる完全配向構造を持ち、せん断層以外の箇所と比較して、ベッドは細粒化している。また、細粒化したベッドは一定方向に再配列しており、完全配向状態にある。
4. 残留強度状態におけるベッドの細粒化の程度の違いは、上載圧および、せん断変位の影響によると考えられる。
5. リングせん断試験における供試体は、予圧密によってベッドが幾分、配列した分散構造にあり、せん断層以外では、大きな構造変化は生じていない。一方で、せん断層のベッドは細粒化し、せん断面と平行に配向している。
6. せん断変位に伴う、せん断強度の変化は、微視的構造の変化と密接な関係があると考えられる。完全軟化強度が発現されるまでは、ベッドの変位および、回転による、噛み合わせの強化によって、せん断応

力が増加する。破壊後は、ベットの細粒化および、再配列の進行に伴ってせん断応力は低下する。最終的には、配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束する。

7. 粘性土においては、せん断変位の増加に伴って、力学的な取扱いをする際の上限単位となるベットの大きさが、破壊の前後で変化すると考えられる。

謝 辞

査読者の方からは、非常に有益かつ貴重なご指摘を頂いた。SEM画像の撮影には、富山県立山カルデラ博物館の機器を使用させて頂いた。ここに記して感謝する。

引用文献

- 1) 地すべりに関する地形地質用語委員会編 (2004): 地すべり地形地質の認識と用語, 日本地すべり学会, pp. 84-85.
- 2) 守随治雄 (1999): 結晶片岩地すべり地における地質と強度特性の関係について とくに善徳地すべり深礎杭掘削面を観察して, こうえいフォーラム, No. 8, pp. 21-35.
- 3) 眞弓孝之 (2004): すべり面せん断試験機の開発とその適用によるすべり面せん断抵抗角の評価, 佐賀大学学位論文.
- 4) 日本地すべり学会 (2013): すべり面-地質の特徴と構造・物性-, 日本地すべり学会.
- 5) 村尾英彦, 澁谷達也 (2003): 地すべり面付近の試料を用いたリングせん断試験による残留強度定数, 地すべり, Vol. 41, No. 4, pp. 71-76.
- 6) Bishop, A. W., Green, G. E. et al. (1971): A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength, Geotechnique, Vol. 21, No. 4, pp. 273-328.
- 7) 村尾英彦, 澁谷達也 (2003): リングせん断試験による地すべり面強度定数決定のための試験条件に関する検討, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 227-228.
- 8) Skempton, A. W. (1970): First-time Slide in Overconsolidated Clays, Technical Notes, Geotechnique, Vol. 20, No. 3, pp. 320-324.
- 9) 社団法人土木学会 (1992): X線粉末回折による鉱物の同定, 軟岩の調査・試験の指針 (案), pp. 142.
- 10) 松尾新一郎, 嘉門雅史 (1976): 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, Vol. 24, No. 1, pp. 59-64.
- 11) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. (1966): Introduction to Soil Behavior, Macmillan.
- 12) 釜井俊孝, 宮田雄一郎 (1993): 地すべり粘性土のいち面せん断における破壊の伝播過程, 地すべり, Vol. 29, No. 4, pp. 9-17.
- 13) 岸本良次郎 (1994): 土の一面せん断試験により得られた剪断層の構造, 地すべり, Vol. 31, No. 1, pp. 10-20.
- 14) 岸本良次郎, 吉田純 (1997): 土のせん断の進行にともなう剪断層構造の変化, 地すべり, Vol. 34, No. 1, pp. 8-14.
- 15) 岸本良次郎 (1997): 含水比による剪断層構造の変化およびせん断層の透水性, 地すべり, Vol. 34, No. 2, pp. 1-8.

(原稿受付2013年4月15日, 原稿受理2015年1月15日)