

学 位 論 文 題 名

繰り返し一面せん断試験による粘土の
残留強度測定方法に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

我が国では、複雑で脆弱な地質、急峻な地形、多量の降雨降雪をもたらす気象、地震、山間部での道路造成などの人間活動、など多くの要因がもとになって、これまでに数多くの地すべり災害を被ってきている。最近では、1995年の兵庫県南部地震や1998年の福島県を中心とした豪雨災害などに見られるように、短時間に100箇所以上に及ぶ斜面変動が発生している。

地すべりのすべり面は、その多くが第三紀の泥岩や凝灰岩などの堆積軟岩に形成されており、ここには「地すべり粘土」あるいは「すべり面粘土」と称される粘土がしばしば存在する。すべり面粘土には、粒子の完全配向を示す鏡肌が認められることから、すべり面に沿って発揮されるせん断強度は、残留強度またはそれに近いと考えられており、斜面の安定性を評価する上での重要な工学的指標となっている。これまでに残留強度に関する測定方法や試料の違いによるせん断特性について多くの研究がなされているが、“残留強度とは何か”という最も基本的な問題すなわちその発現機構の解明を試みた研究は極めて限られている。

一方、地すべり安定解析の信頼性に関わる決定的な要素として、すべり面の強度パラメータの適切な設定が重要な課題となっている。より信頼性の高い解析のためには、すべり面粘土のせん断強度特性の把握と、それに適した試験装置より求めた強度定数に基づいて客観的な解析を行うことが重要である。そこで本研究では、地すべり安定解析に関わる基礎的研究として、粘土の残留強度発現機構に関わる基本概念を整理するとともに、残留強度を精度よく測定し得る汎用性の高い装置を開発することを目的とした。

本論文は6章から構成されている。

第1章は、序論として本研究の背景と目的を述べるとともに、残留強度測定のための室内土質試験方法に関する従来の研究について整理し、本研究の位置付けを行なっている。

第2章では、秋田・岩手・福島県に分布する第三紀層地すべり地のすべり面について、その性状ならびにすべり面(層)粘土の鉱物学的・化学的特性を明らかにしている。すなわち地すべり面は、複数のせん断面が集合した「せん断帯」として認められることが多く、せん断帯には層状の広がりを示す粘土層(すべり層粘土)が分布している。これら粘土層には、しばしば鏡肌が発達するいわゆる主変位せん断面が形成されており、ここには上下の粘土に比べて含水比の高い粘土(すべり面粘土)が存在する。各種分析の結果、すべり面(層)粘土は石英、斜長石、スメクタイト、イライト、カオリン鉱物、緑泥石、などから構成され、とくに膨潤性粘土鉱物のスメクタイトが全ての試料から検出されること、またイライトは、その構造内に膨潤層を有するイライト/スメクタイト混合層鉱物として存在することから、すべり面には膨潤性粘土鉱物が普遍的に含まれていることを指摘している。

第3章では、残留強度の基礎的研究として、摩擦の分野を取り扱う学問であるトライボロジーと粘土の微視的

な粒子間力を対象とするコロイド科学から粘土の残留強度発現機構に関わる基本概念を整理している。

残留状態に至ったすべり面でせん断現象は、その面を境とする上部土塊と下部基盤との二つの固体表面の接触による摩擦現象と理解される。粘土の残留状態を想定した場合、せん断面は水を潤滑媒とした「流体潤滑」、「弾性流体潤滑」、「混合潤滑」のいずれかの状態にあると考えられ、発揮されている残留強度も流体摩擦、弾性流体摩擦、混合摩擦に類似すると推定される。また、粘土はせん断に伴ない粘性抵抗を受けているので、粘性が残留強度発現の一因であると考えられ、粘土が液体的挙動を示すときすなわち流体潤滑にあるときに限り、“絶対反応速度論”から導かれるアイリングの粘性理論が適用されるものと考えられるとしている。

一方、粘土粒子間には引力と反発力の相反する力が作用し、これら粒子相互間力についての考察にあたり、ファンデルワールス引力と拡散電気二重層反発力として整理しているが、2つの表面または粒子を互いに2~3 nm以内に接近させる、つまり拘束するとそれらの間の相互作用をファン・デル・ワールス引力および電気二重層反発力の連続体理論(DLVO理論)で説明できないことが多く、今後非DLVO理論の構築が必要であるとしている。

第4章では、繰り返し一面せん断試験結果に及ぼす影響要因として、せん断方向逆転の影響、せん断面と供試体せん断面間に作用する摩擦力、試料漏れの影響を取り上げ、これらの要因の影響を明らかにする目的で実施したせん断試験結果を基に、繰り返し一面せん断試験から得られる残留強度の妥当性を確認している。

すなわち、せん断方向逆転の影響に関して、試験後のせん断面の構造をSEMを用いて観察し、主変位せん断面を構成するペッドがほぼ完全定向配列を示していることを確認した。このことから残留強度の配向条件を満たしていることが確認された。また、せん断面と供試体せん断面間に作用する摩擦力に関して、せん断箱内に設置した小型ロードセルの測定値から、実用上無視できる範囲にあることを確認したほか、試料漏れに基づく摩擦力の全せん断力に占める割合は無視できず、何らかの試料漏れ対策が必要であることを明らかにした。

また、残留強度に及ぼすせん断速度の影響については、固体表面間の状態を摩擦係数とゾンマーフェルト数との関係で表すストリベック曲線を、残留状態における粘土粒子表面間の摩擦現象に適用することにより、粘土粒子表面の状態に応じてせん断抵抗角(ϕ_r)がせん断速度の増加に対して増加、不変、減少する現象を説明可能なことを示している。

第5章では、繰り返し一面せん断試験結果に及ぼす影響要因の検討結果に基づき、汎用性の観点から繰り返し一面せん断試験機の具備すべき条件を提示するとともに、これらの条件を備えるように新たに開発した「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」の特徴と、試験結果の適用例を示している。本装置は、粘性土および砂質土のピーク強度、完全軟化強度、残留強度を測定することができるほか、主な特徴として、①上下せん断箱間に作用する摩擦力をせん断箱内蔵のロードセルにより測定できる、②含すべり面試料の試験が実施できる、③軽量かつコンパクトで現場への持ち込みが可能である、④データ収録と試験時(圧密定圧条件・圧密定体積条件)の制御がパーソナルコンピュータにより自動化されている、⑤垂直力載荷システムに変位制御方式を採用することで、装置の構成がシンプルかつ制御精度が格段に向上している、などである。粘土を用いた一方向繰り返しせん断試験結果との比較から、両試験から求められた残留強度はほぼ等しく、リングせん断試験結果との比較では、本装置による値がリングせん断試験より低い値を与えることを示した。さらに実際の地すべり地より採取された試料に対し繰り返し一面せん断試験を実施し、求められたせん断強度を用いて設計用強度パラメータを算出することにより装置の実務上の有効性を確認した。

第6章は結論で、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題と展望を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三田地 利 之
副 査 教 授 三 浦 清 一
副 査 教 授 金 子 勝比古
副 査 助教授 米 田 哲 朗

学 位 論 文 題 名

繰り返し一面せん断試験による粘土の 残留強度測定方法に関する基礎的研究

急峻な地形と複雑で脆弱な地質構造の地域が広く分布し、多量の降雨降雪に見舞われる我が国では、これまでに数多くの地すべり災害を被ってきている。

地すべりにおけるすべり面の多くは第三紀の泥岩や凝灰岩などの堆積軟岩に形成され、そこには粘土がしばしば存在する。「すべり面粘土」と称されるこの粘土には、粒子の完全配向を示す鏡肌が認められることから、すべり面に沿って発揮されるせん断強度は、残留強度またはそれに近いと考えられており、斜面の安定性を評価する上での重要な工学的指標となっている。これまでに残留強度に関わる多くの研究がなされてきているものの、最も基本的な問題すなわち残留強度の発現機構の解明を試みた研究は極めて限られている。一方、信頼性の高い地すべり安定解析のためには、ピークから残留状態に至る粘土のせん断特性の評価に適した試験装置の開発が急務である。

以上のような背景のもと、本研究は粘土の残留強度発現機構に関する基本概念を明らかにするとともに、残留強度を精度よく測定し得る汎用性の高い装置の開発を目的としたもので、6章から構成される。研究の成果を要約すると以下のようである。

第1章では、研究の背景と目的を述べるとともに、残留強度測定のための試験方法に関する従来の研究について整理し、本研究の位置付けを行なっている。

第2章では、東北地方に分布する第三紀層地すべり地のすべり面について、その性状ならびにすべり面粘土の鉱物学的・化学的特性を明らかにしている。すなわち、秋田・岩手・福島県に分布する計14箇所地のすべり地より採取したすべり面粘土についての各種分析結果の中から、2事例を採り上げて詳細な検討を加え、すべり面粘土にはスメクタイトに代表される膨潤性粘土鉱物が普遍的に存在することを指摘している。

第3章では粘土の残留強度発現機構について著者独自の解釈を示している。すなわち、残留状態に至ったすべり面でのせん断現象を、粘土粒子表面間あるいは粒子表面と水との摩擦現象と位置づけ、潤滑状態は水を潤滑媒とした「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境

界潤滑」のいずれかの状態にあるとしている。さらに、各潤滑状態における摩擦は、流体潤滑においては流体膜の粘性に、境界潤滑においては粘土鉱物の界面電気化学的性質による固体－流体膜間の相互作用と一部表面凸部同士の接触による凝着力に起因するものと考えられるとしている。

第4章では、残留強度の測定方法として著者が推奨する繰り返し一面せん断試験の結果に及ぼす諸要因の影響を実験的に明らかにしている。まず、試験後のせん断面のSEMによる観察結果から、主変位せん断面を構成するペッドがほぼ完全定向配列を示していることを定量的に明らかにし、残留状態の配向条件を満たしていることを確認した。また、せん断箱内に設置した小型ロードセルの測定値から、せん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力は実用上無視できる範囲にあることを確認したほか、試料漏れに基づく摩擦力の全せん断力に占める割合は無視できず、何らかの試料漏れ対策が必要であることを明らかにした。さらに、残留強度に及ぼすせん断速度の影響について理論的な考察を加え、ストライベック曲線を残留状態における粘土粒子表面間の摩擦現象に適用することにより、粘土粒子表面の状態に応じてせん断抵抗角(ϕ_r)がせん断速度の増加に対して増加、不変、減少する現象を説明可能なことを示している。

第5章では、前章の検討結果に基づき、汎用性の観点から繰り返し一面せん断試験機の具備すべき条件を提示し、これらの条件を満足するように新たに開発した「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」の特徴を述べるとともに、試験結果の適用例を示している。すなわち、リングせん断試験と一方向繰り返しせん断試験結果との比較から、本装置が十分な測定精度を有していることを示し、さらに実際の地すべり地より採取された試料に対し繰り返し一面せん断試験を実施し、求められたせん断強度を用いて設計用強度パラメータを算出することにより装置の実務上の有効性を確認している。

第6章は結論で、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題と展望を述べている。

これを要するに著者は地すべり安定解析に関わる基礎的研究として、粘土の残留強度発現機構に関する基本概念を明らかにするとともに、残留強度を簡便な操作で精度よく測定し得る汎用性の高い装置として「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」を開発し、試験業務を従来より格段に省力化し、かつ高精度化することを可能にした。この成果は、地盤工学ならびに応用地質学の発展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。