



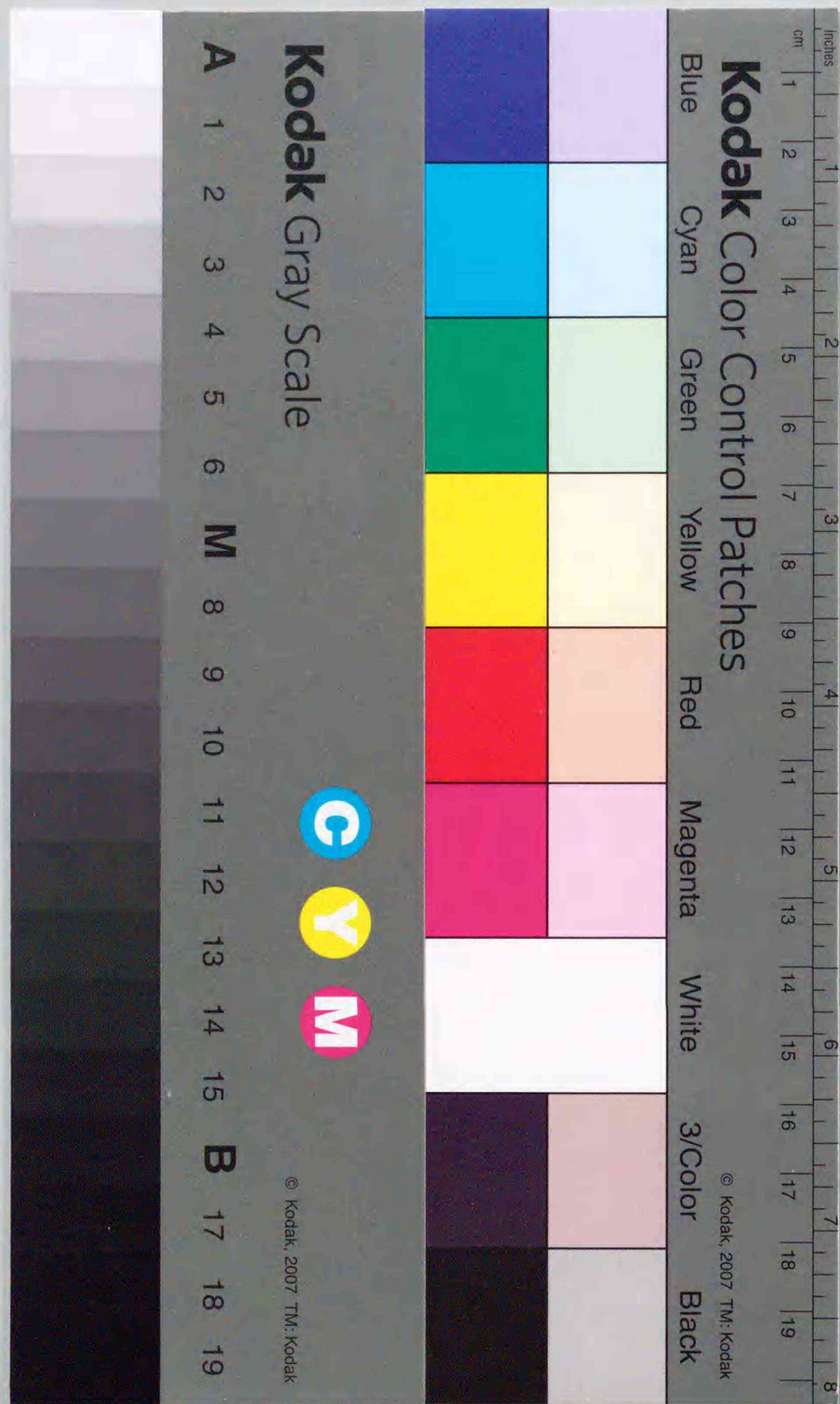
Title	繰り返し一面せん断試験による粘土の残留強度測定方法に関する基礎的研究
Author(s)	大河原, 正文
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第5719号
Issue Date	2000-12-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3178515
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51680
Type	doctoral thesis
File Information	000000395119.pdf



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

2000年12月

大河原 正文



目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 従来の研究	3
1.2.1 残留強度の概念	3
1.2.2 残留強度の測定方法	5
1.3 本論文の構成	11
参考文献	13
第2章 第三紀層地すべりのすべり面の特徴	15
2.1 概 説	15
2.2 東北地方の地すべり面(層)粘土の鉱物学的・化学的特性	17
2.2.1 鉱物学的特性	18
2.2.2 化学的特性	25
2.3 岩手県明倉沢古期地すべり地	27
2.3.1 地すべり地概要	27
2.3.2 すべり層の性状	31
2.3.3 すべり層粘土の鉱物学的・化学的特性	34
2.4 岩手県コシタキ沢古期地すべり地	45
2.4.1 地すべり地概要	45
2.4.2 すべり層の性状	48
2.4.3 すべり層粘土の鉱物学的・化学的特性	50
2.5 本章のまとめ	54
参考文献	55

第3章 粘土の残留強度発現機構	57
3.1 概説	57
3.2 摩擦の分類	58
3.3 摩擦係数	59
3.4 ストライベック曲線と潤滑状態	61
3.5 各潤滑状態における摩擦の起因	63
3.6 粘性理論	68
3.6.1 アイリングの粘性理論	68
3.6.2 流体膜の粘性	73
3.7 凝着理論	74
3.7.1 凝着理論概説	74
3.8 界面における相互作用	76
3.8.1 スケールごとの相互作用力	76
3.8.2 残留強度に影響を及ぼす相互作用力	79
3.9 本章のまとめ	81
参考文献	83
第4章 繰り返し一面せん断試験方法に関する影響要因	85
4.1 概説	85
4.2 せん断面の構造に及ぼすせん断方向逆転の影響	87
4.2.1 繰り返し一面せん断試験による粘土のせん断面の構造 と形成過程	87
4.2.2 繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度の妥当性	106
4.3 せん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力の影響	107
4.3.1 学会基準(一面せん断試験)における摩擦の取扱い	107
4.3.2 全せん断力に占める摩擦力の割合	109
4.4 上下せん断箱隙間からの試料漏出によるせん断箱間に作用 する摩擦力の影響	112
4.4.1 従来の試料漏れ対策	112
4.4.2 全せん断力に占める摩擦力の割合	113

4.5 残留強度に及ぼすせん断速度の影響	115
4.5.1 せん断抵抗係数とせん断速度に関する従来の研究	115
4.5.2 ストライベック曲線とせん断速度	116
4.6 本章のまとめ	119
参考文献	120

第5章 地すべり解析用小型自動繰り返し一面せん断試験装置の開発と 試験結果の適用	122
5.1 概説	122
5.2 小型自動繰り返し一面せん断試験装置の特徴	124
5.3 カオリン粘土による試験実施例	132
5.3.1 繰り返し一面せん断試験	132
5.3.2 試験後のせん断面のSEM観察	135
5.4 他のせん断試験方法との比較	137
5.4.1 一方向繰り返し一面せん断試験との比較	137
5.4.2 リングせん断試験との比較	140
5.5 地すべり解析用強度パラメータの算定例	141
5.5.1 Mitachiらの強度パラメータの決定方法	141
5.5.2 銅山川地すべりの強度パラメータ	143
5.5.3 横手地すべりの強度パラメータ	147
5.6 本章のまとめ	151
参考文献	153

第6章 結 論	154
6.1 研究成果の総括	154
6.2 今後の展望と課題	158
記号表	159
謝 辞	161

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

我が国では、山地などの傾斜地の多い地形、複雑で脆弱な地質、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2月の兵庫県南部地震や1998年8月の福島県南部を中心とした豪雨災害などに見られるように、短時間に数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といった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。集水井や排水トンネルなどで観察されるすべり面には、しばしば構成粒子の定向配列を示す鏡肌が認められることから、すべり面でのせん断強度は、非常に大きなせん断変形を受けて残留状態に至った時点でのせん断強度である残留強度またはそれに近いと考えられている^{1)~5)}。このような残留状態におけるせん断面（完全配向面）の相対変位を考えたとき、それは粘土粒子表面間あるいは粒子表面－水との摩擦現象と理解されることから、強度発現には、粘土粒子間に作用している物理的・化学的作用が複雑に絡み合っているものと考えられる。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は多くの研究がなされているものの、両作用を考慮した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。”残留強度とは何か”という問題は、この物理的作用・化学的作用を同時に考慮してこそ満足な解答が得られると考える。残留強度が地すべりなど斜面の安定性を評価する上での重要な工学的指標である以上、その理論的根拠を明確にすることは重要である。

申⁶⁾は、地すべり安定解析の4大条件として、①基岩面、②すべり面の形、③地すべり面粘土の粘着力(c)と内部摩擦角(ϕ)、④間隙水圧のとり方、の4条件を取り上げている。ここに示された条件は、いずれもすべり面に関するものであり、とくに見かけの粘着力(c)とせん断抵抗角(ϕ)は、間隙水圧のとり方とともにその妥当性が安定性評価の信頼性に関わる決定的な要素となっている。実務では、これら強度パラメータの決定を、経験的解析手法である“逆算法”により行っているのがほとんどである。この方法は、見かけの粘着力(c)を $c_0 \equiv d$ (kN/m^2) (d :地すべり土塊の厚さ(m))として求め、現状安全率 $F_0=1.0$ とおいた安定計算式に c_0 の値を代入してせん断抵抗角(ϕ)を求めている。 $c_0 \equiv d$ (kN/m^2)の根拠は、運動速度の比較的小さい地すべりでのすべり面試料を用いた土質試験結果より、見かけの粘着力は先行荷重(土塊の厚さ)に比例し、最大層厚の1/10にほぼ一致しているという経験に基づいているようである。逆算法は、即応性を要求される災害時に迅速に対応出来ることや、すべり面が正確に把握されていれば技術者による計算結果のばらつきがない、などの実用的な面がある一方で、土塊の荷重均衡をもとにした力学的条件だけで c 、 ϕ を決定しており、すべり面での強度特性を考慮していない点が問題である。より信頼性の高い地すべり安定解析のためには、すべり面構成物質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安定解析を行うことが重要と考える。

よって本研究では、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、繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度の妥当性を検証し、残留強度を精度よく測定し得る実用的な試験装置を開発することを目的とした。

なお、本論で対象とした残留状態でのせん断機構は、扁平な粒子が卓越した粘土が相対的に変位するときの「すべりせん断(Sliding Shear)」機構⁷⁾であり、せん断面には鏡肌が形成されるようなものを想定している。

1. 2 従来の研究

1.2.1 残留強度の概念

残留強度とは、“排水せん断あるいは定圧せん断試験において、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して定常状態に達したときの値”⁸⁾と定義されており、移動距離の大きい地すべりのすべり面でのせん断強さを表していると考えられている。土の残留強度に関する研究は、Skempton⁹⁾の先駆的研究をはじめとして多くの研究がなされており^{10)~13)}、その工学的重要性が認識されてきている。

図-1.1にSkempton⁹⁾が示した残留強度の概念を模式的に示す。ここでピーク強度とは、過圧密状態において発揮される最大せん断抵抗応力のことであり、完全軟化強度とは、練返し再構成粘土の正規圧密状態において発揮される最大せん断抵抗応力のことである。Morgenstern・Tchalenko¹⁴⁾は、これら最大せん断強度を発揮しているときのせん断挙動を、カオリン粘土を用いた一面せん断試験結果から、ピーク付近までは単純せん断的なせん断挙動であり、せん断面には、せん断方向に斜交する不連続なせん断面(Riedel Shear)が形成されているだけで、せん断面が両端に達するいわゆる主変位せん断面の形成は、その後の残留状態に至る過程で形成されるとしている。

残留強度は、ピーク強度を過ぎてさらに変位が進み最終的に一定値に落ち着いた段階でのせん断強度として定義されるものである。せん断面は大変位を経験しているため、面を構成している平板状あるいは鱗片状の粘土粒子はせん断面に沿って配向していることが確認されており^{12), 15)}、地すべり面の現場観察からも粒子の定向配列を示す鏡肌が確認されている。

このようにせん断面の構造に着目すると、残留強度とは平板状あるいは鱗片状の鉱物粒子を含む粘土においては、せん断方向への粒子の配向が完全に終了し、せん断に伴う体積変化 $\Delta V \equiv 0$ のときに発揮されるせん断強度と考えられる。このような間隙比一定のもとでのせん断現象は、せん断面を境とする粘土粒子表面間あるいは粒子表面-水との摩擦現象と理解され、この状態で得られるせん断抵抗角： ϕ_r は、Ilvorslevの破壊基準における有効せん断抵抗角： ϕ_e に相当する。

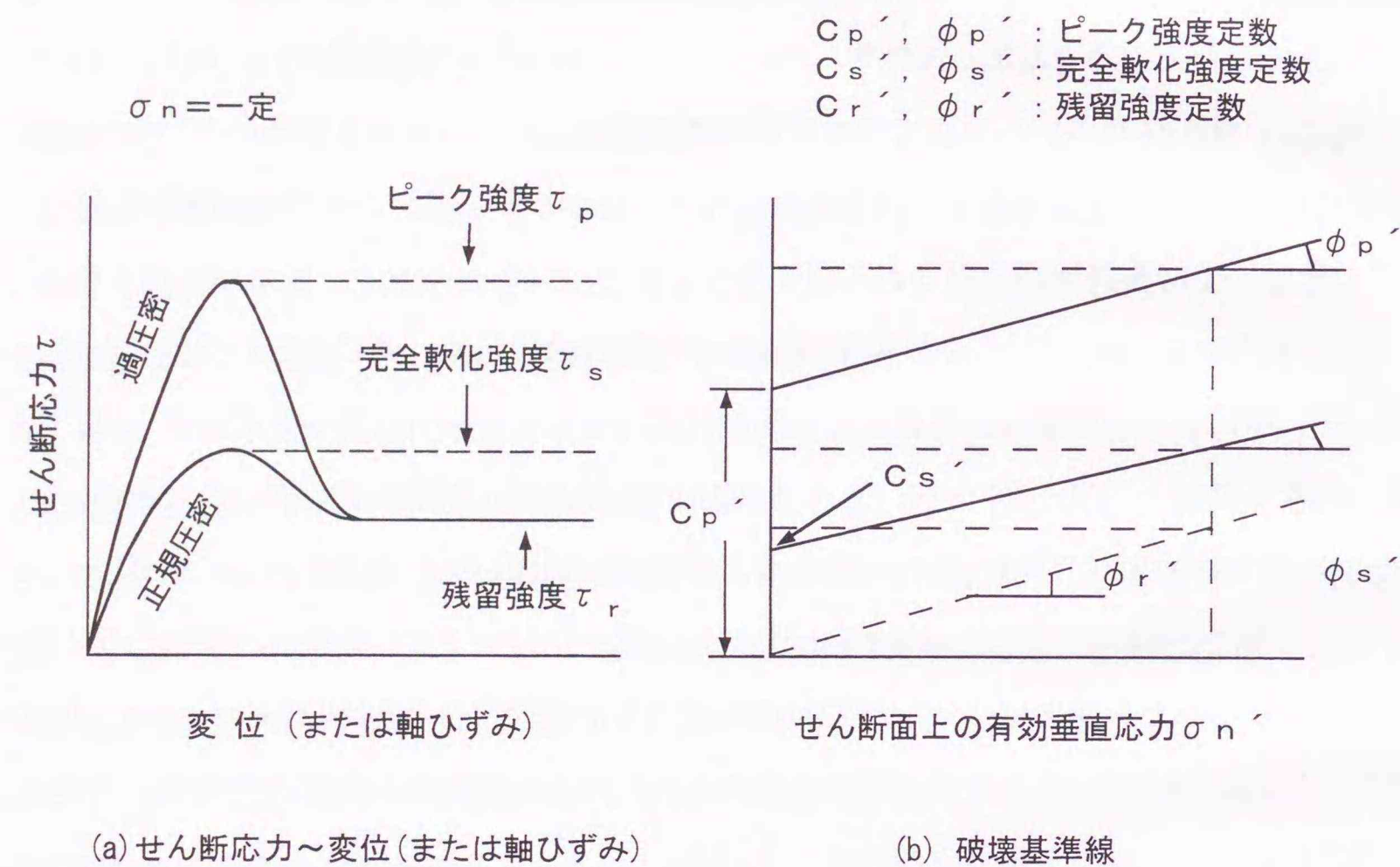


図-1.1 ピーク、完全軟化強度および残留強度におけるせん断強度の概念図

1.2.2 残留強度の測定方法

(1) 繰り返し一面せん断試験

繰り返し一面せん断試験は、限られたせん断面の中で一定方向または前後方向に一面せん断を繰り返すことにより供試体に変位を与える試験である。この試験は、一定変位を与えた後、せん断箱をすみやかにもとの位置に戻し再度せん断を繰り返す方法^{(9), (16), (17)}と、一定変位後にそれとは逆方向にせん断を繰り返すことで変位を与える方法^{(18), (19)}とがある。繰り返し一面せん断試験機の概要を図-1.2に示す。試験機には、せん断箱の繰り返し移動を可能にする変位機構が備わっているが、それ以外の構造は基本的に通常の一面せん断試験装置と同等である。

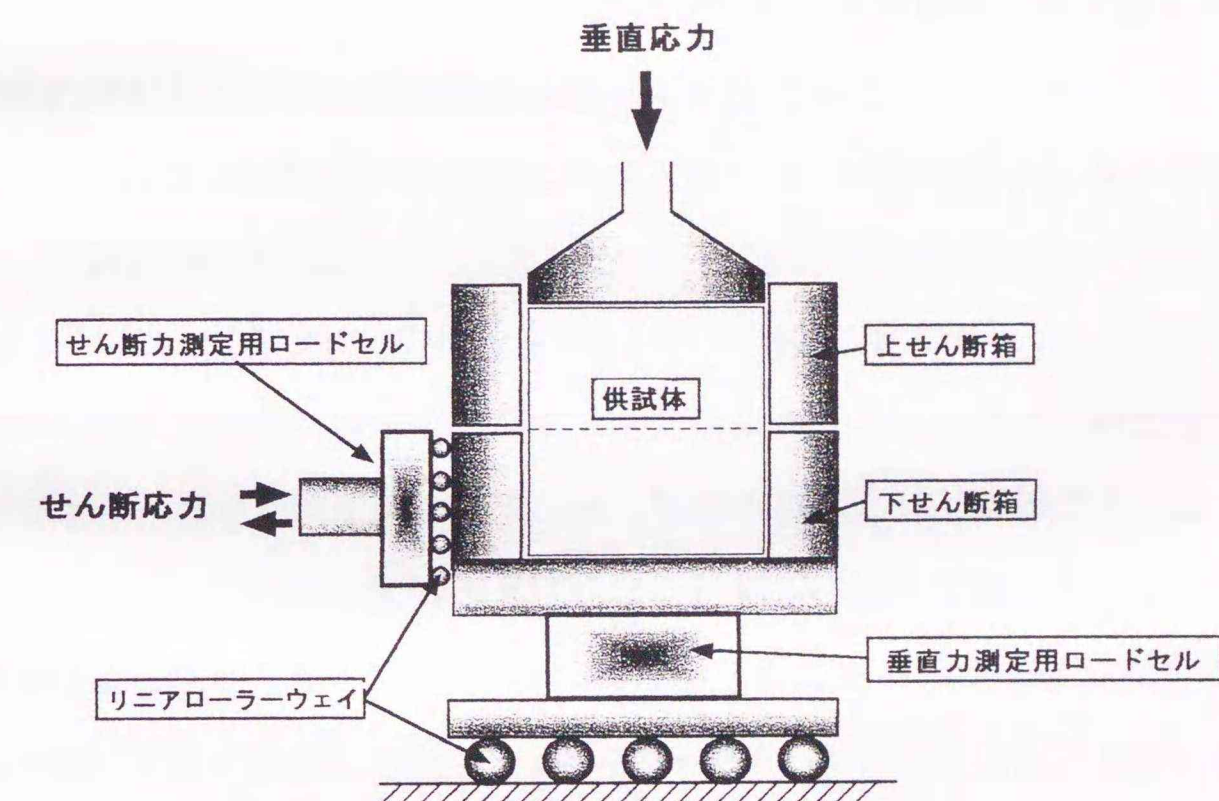


図-1.2 繰り返し一面せん断試験概念図

繰り返し一面せん断試験は、構造が単純で操作が簡単、小型・軽量化による現場での試験の実施、定体積試験の実施により試験時間の短縮が図れる、供試体の成形が容易で不撓乱試料や含すべり面試料の試験が実施できる、などの利点を有する。「含すべり面試験」とは、実際の地すべり面をプレカット面として利用するもので、せん断面の状態を実際の地すべり面に近づけるという点では最も精度の高い試験方法である。この試験では、すべり面をせん断箱のせん断面に一致させ、かつ、実際のすべり方向にせん断方向を合わせることが重要であるが、せん断箱程度の大きさでは、地すべりの滑動方向(すべり面の擦痕方向)がほぼ直線状なので、本試験のせん断方向と一致させやすい。このように繰り返し一面せん断試験は、通常の一面せん断試験が有する利点をそのまま生かすことが出来るほか、一面せん断試験とは異なる繰り返し一面せん断試験特有の特徴がある。その最大の特徴は、残留強度の測定が上せん断箱と下せん断箱の相対変位がゼロのとき測定されるために、残留強度測定時の状態が実際の地すべり面のせん断特性に非常に類似していることにある。すなわち、測定時はせん断面の有効面積の減少はゼロで、供試体せん断面は全ての範囲において接している。さらにせん断方向は直線状の一定方向であり、これは前述のとおり、実際の地すべり面でのせん断現象と同じである。

一方、繰り返し一面せん断試験は、通常の一面せん断試験が本来もっている問題点、例えば供試体内部の応力分布の不均一さ、せん断中の有効せん断面積が変わることによるせん断箱－供試体せん断面間の摩擦の影響、などの問題点も持ち合わせている。

(2) リングせん断試験

リングせん断試験は、図-1.3に示されるように圧密したドーナツ型の飽和供試体に一定圧の垂直応力を加え、排水条件下で一般には供試体の下部せん断箱を回転させてひずみ制御で行うせん断試験²⁰⁾とされている。このように本試験は、せん断中の供試体の断面積を変えることなく一定方向に無限の変位を与えることができるため、せん断面の状態を実際の地すべり面に近い状態で再現できるとの認識から、残留強度を求める試験として最適であると考えられている²⁰⁾。

リングせん断試験機は、Bishop²¹⁾がノルウエー土質工学研究所と共同開発した型式に代表され、我が国においても矢田部ら²²⁾、佐々ら²³⁾、宜保²⁴⁾、釜井²⁵⁾がこれに改良を加えた試験機を製作している。とくに、Bishopの考案した構造では、上部せん断箱が試験機本体に完全に固定されていないため、試験時に発生する上せん断箱の”ブレ”に起因した周期的な応力変動が問題とされ、宜保²⁴⁾は回転軸とせん断箱を一体化構造とすることでこの問題を解消したとしている。

ここでは、主に斜面安定問題を対象としたときのリングせん断試験の特徴を示す。

- ①一定方向に連続して無限の変位を与えることができるため、せん断面の状態を実際の地すべり面に近い状態で再現できる。
- ②しかし、実際の地すべり面に近づけるという点では最も精度の高い「含すべり面試験」は実施できない(直線状の擦痕方向とせん断方向を一致できない)。
- ③せん断中の供試体の断面積が変わらず、常に供試体せん断面は全範囲で接触しているため、繰り返し一面せん断試験のようにせん断箱と供試体せん断面間の摩擦は発生しない。
- ④せん断箱と供試体との接触面積が大きいため、周面摩擦の影響が大きく、垂直応力を間接的手法による測定に頼っている現状において、垂直応力の測定値の誤差が生じやすい。
- ⑤試料は一般に大きく多量に必要で、かつ試料をドーナツ状に成形しなければならないため、不撓乱試料の残留強度を得ることは容易ではない。
- ⑥不撓乱試料を用いることが困難なことから、繰り返し試料の作製にかかる時間を省くことができない。加えて、排水条件を満たすせん断速度で試験を行うため、多段階载荷方式による定体積条件での試験を実施しない限り試験に長時間を要する。
- ⑦粗粒成分を多く含む試料では、試験精度の確保が難しいため、使用できる試料が細粒分

に限定される。これは、粗粒分の多い破碎帯地すべりのすべり面粘土をそのまま利用して残留強度を得ることが出来ないことを意味する。

⑧特に工夫しない限りリング隙間から試料が漏出し摩擦が発生する。試験中に摩擦力を直接測定することは現状では困難である。

⑨試験機の構造が複雑なため操作が難しく、ドーナツ状の供試体の成形が簡単でないなど、試験の実施に熟練を要する。

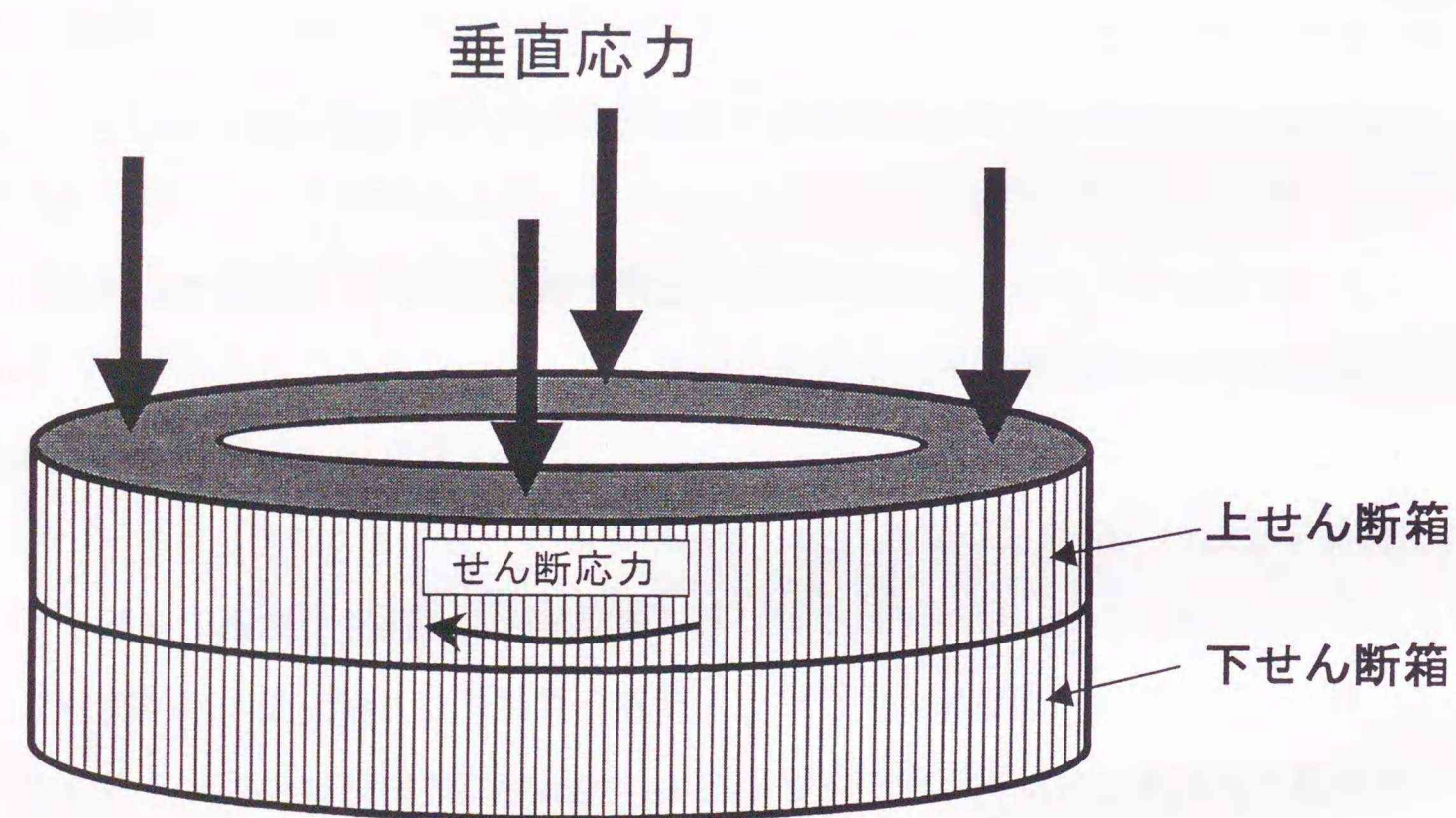


図-1.3 リングせん断試験概念図

ところで、従来より繰返し一面せん断試験より得られる残留強度がリングせん断試験より大きいとの報告^{21), 24), 26)}があり、せん断方向の逆転による粒子の乱れの影響が懸念されている。粒子配向に関わる繰返しせん断の影響がこれまで必ずしも正確に知られていないことが、繰返し一面せん断試験から得られる残留強度の妥当性を疑問視する最大の原因になっている。古谷²⁷⁾は、リングせん断試験と繰返し一面せん断試験との残留値の違いについて、リングせん断試験の周面摩擦の大きさに起因する垂直応力の測定誤差が主な原因と考えている。せん断面上の垂直応力の測定は、せん断面上に直接荷重計を設置するなどして測定することが事実上できないため、間接的な手法により測定されている。主な測定方法は、①供試体上下両面で垂直応力を測定することにより、せん断箱内での周面摩擦の影響を補正する方法、②上下どちらか一方のせん断箱を試験機の他の部分から独立させて垂直ロードセルに直接取り付けすることで、せん断箱内の周面摩擦の影響を受けることなく垂直応力を測定できる構造にして測定する方法、の2つの方法が採用されている。これらは、周面摩擦の影響を取り除くための工夫であるが、間接的手法である以上、両者とも前提条件がある。①については周面摩擦が均等に発生していることが前提であり、②は、載荷板側の供試体が垂直荷重計を設置している側のせん断箱に影響を及ぼさないことが前提となっている。残留強度の測定は、大変位と長時間を要するため、載荷板側の供試体のせん断面が凸状を呈し、垂直力を測定している側の供試体せん断面側に入り込むことがしばしば見られる。このように、垂直応力を間接的手法によって測定している現状では、周面摩擦の影響を完全に取り除くことは非常に困難であることから、せん断箱内面と供試体とが接する面積、つまり周面摩擦の発生する範囲の少ない試験が、より正確な垂直応力を測定しているものとする。この点において、繰返し一面せん断試験は、リングせん断試験より、大幅に接触面積が少なくより正確な垂直応力が測定されているものとする。

(3) プレカット試料による三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は、繰返し一面せん断試験やリングせん断試験などの直接せん断試験に比べて、供試体内部の応力やヒズミの分布を一様にでき、また排水条件の制御も容易であるなど原位置の状態に近い条件に合わせて試験を行うことができる。そのため、これまでに主としてプレカット供試体を用いて残留強度を求める試みがなされてきた。Chandler²⁸⁾は、標準の三軸試験機に载荷キャップが傾くことなく水平移動出来るようにするなどの改良を加えた試験機を用いて、プレカット試料の残留強度を測定している。供試体には、予想される残留状態におけるせん断抵抗角(ϕ_r)から $(45^\circ + \phi_r/2)$ の角度でせん断面を入れた供試体を用いている。Bishopら²⁹⁾、Webb³⁰⁾はプレカット面の角度と実際に形成されるせん断面との角度誤差の影響を解消すべく载荷キャップが自由に傾くような構造に改良した試験機を用いてロンドン粘土の残留強度を求めている。また、最近では多段三軸試験方法を採用して内堀ら³¹⁾が地すべり粘土の残留強度の測定を試みている。多段階三軸試験とは、一つの供試体を異なる側圧のもとで試験する方法であり、同一の供試体から強度パラメータを求めることができるため、プレカット供試体の作製の手間を減らせる利点を有している。しかし、多段階三軸試験方法は、縦ひずみ、横ひずみ、間隙水圧などから総合的に破壊を予測しなければならないため試験の制御に問題が生じ、加えて、粘土のような軟らかいものを供試体としたときは、破壊予測が非常に難しいなどの理由により、この方法では残留強度を求めるのは困難であるとしている。

これら三軸試験から得られた残留強度は、多くの場合においてリングせん断試験や繰返し一面せん断試験より求められた残留値よりも、大きくなることが知られている。三軸試験による残留強度の測定は、試験装置の機構上、残留強度の必要条件とされる大変位を与えることが難しく、また、プレカット試料としてあらかじめ供試体に入れるせん断面の角度の取り方に不正確さがあること、ピークを過ぎた変形過程において荷重の水平分力により载荷ピストンに曲げ応力が発生するため誤差が大きくなること、などの欠点があり、最近では使われていない。

1. 3 本論文の構成

本論文は、次の6章から構成されている。

第1章 序論

第2章 第三紀層地すべりのすべり面の特徴

第3章 粘土の残留強度発現機構

第4章 繰返し一面せん断試験方法に関する影響要因

第5章 地すべり解析用小型自動繰返し一面せん断試験装置の開発と試験結果の適用

第6章 結論

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う。

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の特徴を述べる。すなわち、秋田県、山形県、岩手県に分布する計12個所の地すべり地より採取されたすべり面(層)粘土の各種分析結果に基づき、その鉱物学的・化学的特性を明らかにする。さらにこの中から2事例を取り上げ、古期すべり面の形態的特徴ならびにすべり面(層)粘土の物理的特性、鉱物学的・化学的特性について詳細な研究結果を述べる。

第3章では、残留強度の基礎的研究として、トライボロジーと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する。残留状態におけるせん断現象は、粘土粒子表面間あるいは粒子表面-水との摩擦現象として理解され、残留強度の発現に粘土粒子間に作用している物理的・化学的作用が複雑に絡み合っていると考えられる。よって、トライボロジーで取り扱っている摩擦や潤滑の理論、ならびにコロイド科学の粒子相互作用力が粘土の残留強度発現機構を理解する上で有効と考えた。

第4章では、繰返し一面せん断試験方法に関する影響要因として、せん断機構と試料漏れの影響を取り上げ、これらの要因について粘土の繰返しせん断試験結果に基づいて

考察する。また、従来より指摘されているせん断速度と残留強度との関係について、トライボロジーと粘性理論の展開により、その理論的根拠を明確にする。以上の検討結果をもとに繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度の妥当性を検証する。

第5章では、信頼性の高いせん断強度の測定方法について論じる。すなわち、第4章で検討した繰り返し一面せん断試験機の具備すべき条件を備えた「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」を開発し、粘土を用いた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、本装置による繰り返し一面せん断試験の測定精度を確認する。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Mitachiらの強度パラメータの決定方法により設計用強度パラメータを算出する。

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る。

<参考文献>

- 1) Early, K. R.・Skempton, A. W. :Investigations of the landslide at Walton's Wood, Stanfordshire, Q. J. Eng. Geol., Vol. 5, pp. 19~41, 1972.
- 2) Hutchinson, J. N.・Somerville, S. H.・Petley, D. J. :A landslide in Periglacially disturbed Etruria Marl at Bury Hill, Stanfordshire. Q. J. Eng. Geol., Vol. 6, pp. 377~404
- 3) 中森克巳・楊普才:地すべり粘土の残留強度測定について, 地すべり, 第28巻, 第2号, pp. 27~32, 1991.
- 4) 申潤植:地すべり屋の回顧, 地すべり, 第36巻, 第2号, pp. 1~2, 1999.
- 5) Skempton, A. W. :Long-term stability of clay slopes, Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 77~102, 1964.
- 6) 申潤植:地すべり工学—理論と実践—, 山海堂, 1989.
- 7) Lupini, J. F., Skinner, A. E. and Vaughan, P. R. :The drained residual strength of cohesive soils, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 181~213, 1981.
- 8) 土質工学標準用語集, 地盤工学会, 1996
- 9) Skempton A. W. :Long-term stability of clay slopes, Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 77~102, 1964.
- 10) Bromhead, E. N. :Large landslides in London Clay at Heme Bay, Kent, Quart. J. Engng. Geol., Vol. 11, pp. 291~304, 1978.
- 11) Skempton, A. W. :Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3~18, 1985.
- 12) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. :Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 456~462, 1987.
- 13) Nakamori, K., Yang, P. and Sokobiki, H. : Strength characteristics of undisturbed landslide clays in tertiary mudstone, Soils and Foundations, Vol. 36, No. 3, pp. 75~83, 1996
- 14) Morgenstern, N. R., Tchalenko, J. S. :Microscopic Structure in Kaolin subjected to Direct Shear, Geotechnique, Vol. 17, pp. 309~328, 1967.
- 15) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・多田元彦・佐野彰:繰り返し一面せん断試験後の粘土および軟岩のせん断面のSEM観察, 土木学会第50回年次学術講演会, III-192, pp. 384~385, 1995.
- 16) Skempton, A. W. and Petley, D. J. :The strength along structural discontinuities in stiff clays,

Proc. Geotechnical conference, Oslo, Vol. 2, pp. 29~46, 1967.

- 17) 中川渉:神戸層郡地すべり粘土の安定を評価するための一面せん断試験例, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 575~576, 1998.
- 18) 佐野彰・三田地利之・澁谷啓:地すべり面強度定数決定のための軟岩用自動繰返し一面せん断試験機の開発, 地すべり, 第31巻, 第2号, pp. 41~45, 1994.
- 19) 中森克巳・周藤宜二:繰返し一面せん断試験機を用いた地すべり粘土の強度測定, 土と基礎, Vol. 36, No. 5, pp. 31~36, 1988.
- 20) 建設省土木研究所, 土質試験方法—すべり面粘土のリングせん断試験方法(案)—, 1999. 20)
- 21) Bishop, A. W., Green, G. E., Garge, V. K., Andresen, A. and Brown, J. D.: A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, Geotechnique, Vol. 21, No. 4, pp. 273~328, 1971.
- 22) 矢田部龍一・八木則男・榎明潔:破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性, 土木学会論文集, No. 436 / III-16, pp. 93~101, 1991.
- 23) 佐々恭二・福岡浩・島通保:高速高圧リングせん断試験機の開発と地すべりにおける急速载荷時のせん断強度変化, 京都大学防災研究所年報, No. 32B2, 1989.
- 24) 宜保清一:残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度, 地すべり, Vol. 31, No. 3, pp. 24~30, 1994.
- 25) 釜井俊孝:地すべりにおけるすべり面の形成と破壊の伝播に関する実験的研究, 日本大学博士論文, 1994.
- 26) 矢田部龍一・八木則男・向谷光彦・榎明潔:土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響, 土木学会論文集, No. 554 / III-37, pp. 139~146, 1996.
- 27) 古谷保:残留強度の性質とその測定法について, 地すべり, 第20巻, 第1号, pp. 21~27, 1983.
- 28) Chandler, R. J.: The measurement of residual strength in triaxial compression, Geotechnique, Vol. 16, pp. 181~186, 1966.
- 29) Bishop, A. W.・Webb, D. L.・Lewin, P. I.: Undisturbed samples of London clay from the Ashford common shaft: Strength-effective stress relationships, Geotechnique, Vol. 15, pp. 1~13, 1965.
- 30) Webb, D. L.: Residual strength in conventional triaxial tests, Proc. 7th, Conf. on S. M. F. E., Vol. 1, pp. 433~441, 1969.
- 31) 内堀真吾・平田晴昭:多段三軸試験による地すべりの安定性評価, 第32回地すべり学会研究発表講演集, pp. 453~456, 1993.

第2章 第三紀層地すべりのすべり面の特徴

2. 1 概 説

本章では、東北地方に分布する第三紀層地すべり地から採取されたすべり面(層)粘土の鉱物学的・化学的特性を述べるとともに、さらに実務においてとくにその判定が困難とされる古期すべり面を2事例取り上げ、その形態的特徴ならびにすべり面(層)粘土の物理的特性、鉱物学的・化学的特性について明らかにする。

ところで第三紀層地すべりとは、小出¹⁾により提唱された地すべり分類であり、地すべり分布と地質図の対比から、第三紀層地帯に地すべりが多いという結果に基づいている。しかし、この分類は主に50万分の1の地質図によるもので、高野の研究例²⁾にもあるように、縮尺5万分の1の地すべり分布図を基に地質学的観点からその分布状態をみると、必ずしも第三紀層地域に限られた分布を示していないようである。そもそも、地すべりが発生した地質が属している地質体を素因とする分類は、発生頻度に基づいた統計的データに基づいているため、個々の地すべりを支配している地質素因が必ずしも明らかでない。最近の研究では、すべり面の形成された地層や岩石の種類、あるいはすべり面や冠頭部、側方などを分離する割れ目や弱面などを、地質素因にする例が多い。以上より、小出の分類は先駆的研究としての価値は認めるものの、現状において修正すべき点があると判断する。さらに本研究では、すべり面が地質素因の重要な要素をなすとの考えから、本論では、地すべり面が第三紀層に形成されているものを第三紀層地すべりとする。

次に、地すべり面の実態とはいかなるものか、詳細な観察事例を述べる。岩渕ら³⁾は、福島県抜戸地すべりの集水井におけるすべり面の観察から、すべり面は平板状の鏡肌を有し、擦痕の方向は地すべり方向と一致しているとし、さらにすべり面粘土は非常に薄く厚さは1mm以下である

こと、すべり面を挟む厚さ80cmの区間には、鏡肌を有し擦痕の不明瞭なせん断面が数多く形成されていること、このせん断面は、すべり面とは異なって平板状ではなく、滑らかなカーブを描いていること、などを報告している。紀平⁴⁾は、長崎県平山地すべり、愛媛県奥大栄地すべり地などでの調査から、すべり面には、上下の地層と異なる3~8cmの厚さの粘土層が存在するとし、すべり層粘土の内部または上下面には、鏡肌と条線で特徴づけられるせん断面が生じていること、せん断面での含水比は直上部分の粘土に比べ4~12%も高いこと、などを報告している。また、千木良⁵⁾は、長崎県北松浦郡の古第三系佐世保層群の凝灰岩中に形成された平山地すべりのすべり面の観察から、10cmの凝灰岩に鏡肌をもつすべり面が複数あり、全体としてはすべり層とでも言うべきものであるとし、すべり層には厚さ数mm程度の色調の異なる層が縞模様を作っていること、この縞模様は地すべりの滑動方向と逆方向に傾斜し、縞がすべり面近くで活動方向に引きずられたり、微細な褶曲をしたりしていること、すべり層の中には、直径数mm以下の破片が多数含まれ、これら破片の多くは丸みを帯びており、その表面は鏡のように磨かれていること、などを述べている。これらはすべり面観察の一例ではあるが、すべり面を正確に記述したものである。

ここに、従来の研究も含め^{3)~8)}すべり面性状の特徴を上げると、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、この「せん断帯」には、しばしば「地すべり粘土」あるいは「すべり面粘土」と称される高塑性土が存在する。さらに、滑動している地すべりのすべり面粘土には、鏡肌が発達していることが多いようである。本研究では、これら特徴に基づき粘土を伴うせん断帯を「すべり層」とし、それに含まれる粘土を「すべり層粘土」と称する。さらに、鏡肌が発達したいわゆる主変位せん断面を構成する粘土を「すべり面粘土」とする。したがって、すべり面粘土はすべり層粘土に含まれる。すべり層とすべり層粘土は、滑動以前の熱水変質作用や続成作用、滑動時における岩石の破碎作用、滑動後の化学的風化あるいは上位土塊からの粘土分の流入など、地すべりに直接関係する活動のほか、地質学的時間スケールの中で、地下水の浸透などによる影響を大きく受けているものとみられる。

2. 2 東北地方のすべり面（層）粘土の鉱物学的・化学的特性

本章では、東北地方に分布する第三紀層地すべり地のすべり面の特徴を、実際の地すべり地より採取されたすべり層(面)粘土の各種分析結果に基づき、その鉱物学的・化学的特性を明らかにする。さらに2事例を特に取り上げ、古期すべり面の形態的特徴ならびにすべり層(面)粘土の物理的特性、鉱物学的・化学的特性について記述する。分析に用いた試料は、秋田県、山形県、岩手県の新第三紀前期~新第三紀鮮新世の地層中にすべり面が形成されている12箇所の地すべり地より合計18試料採取された(図-2. 1)。

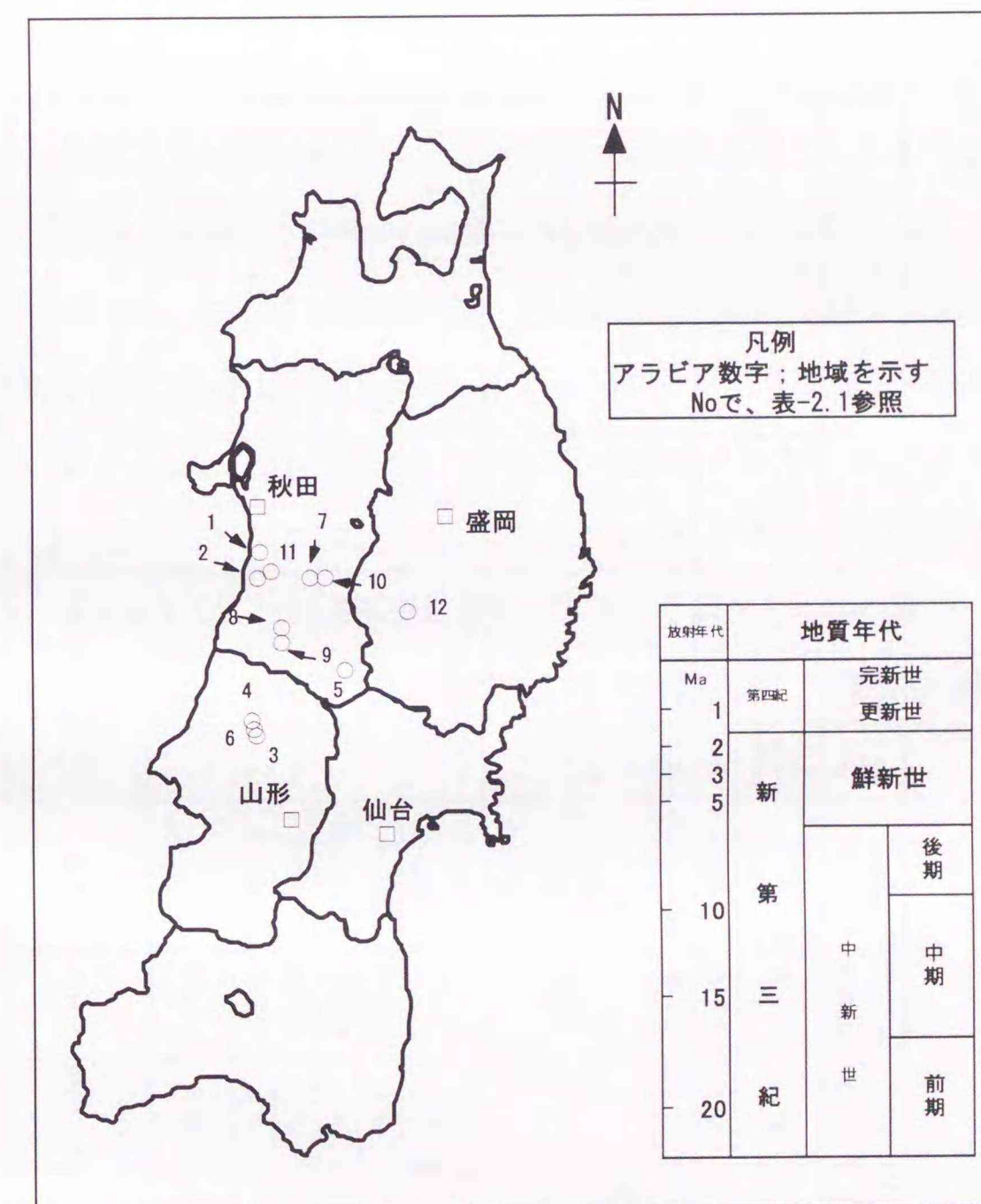


図-2. 1 試料採取地

2.2.1 鉱物学的特性

すべり面粘土の鉱物分析結果を表-2.1に、イライトの評価結果を表-2.2に示す。

(1) 構成鉱物

全ての試料から膨潤性粘土鉱物のスメクタイトが検出されたほか、石英、斜長石、沸石類、カオリン鉱物、緑泥石、イライトが検出された。とくにイライトと緑泥石は、新第三紀中新世中期の地すべりからは全く検出されず、また沸石や斜長石などの造岩鉱物は、地質年代の新しい試料中に比較的多量含まれる傾向がある。

(2) スメクタイトの鉱物学的評価

全試料中に含まれるスメクタイトの種を決定するために(060)反射によるdi/tri型の判別と、リチウム飽和処理による置換型の判別を行った。なお、約半数の試料から明確な回折線を得ることができなかったためこれらの判別は断念した。判別可能なX線プロファイルから、No. 5-1以外の試料はすべてdi型に判別され、置換型はNo. 2-1、No. 4-1以外はすべて八面体置換型であった。以上より、No. 2-1はノントロナイトまたはバイデライトに同定され、No. 7-1、No. 7-3、No. 8-1、No. 10-2、No. 12-2はそれぞれモンモリロナイトに同定された。

メチレンブルー吸着法によりスメクタイトの定量分析を行った。スメクタイトの含有割合は9.9wt. %～85.2wt. %と幅広い含有割合を示し、中新世中期の地すべりに多く含有される傾向を示している。

表-2.1 第三紀層地すべりのすべり面（層）粘土の各種分析結果（鉱物学的特性）

地質年代	地すべり番号	地層名	岩相	すべり面の性状	試料番号	検出鉱物										スメクタイトの定性・定量分析結果			
						粘土鉱物					その他の鉱物					(060) 反射	Li - Test		種
						Sm	I/S	Chl	Kao	Qtz	Pl	Zeo	tri型	四面体置換型	八面体置換型				
新第三紀 中新世 前期	No. 1	天徳寺層	砂質凝灰岩	すべり面	No. 1-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	29.4
			砂質凝灰岩	すべり面	No. 1-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	○	-	29.7
	No. 2	船川層	砂質凝灰岩	すべり面	No. 2-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	Non, Be	44.2
			黒色泥岩	すべり面	No. 2-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	17.0
	No. 3	野口層	砂質凝灰岩	すべり面	No. 3-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	21.0
			黒色泥岩	すべり面	No. 3-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	9.9
新第三紀 中新世 中期	No. 4	野口層	凝灰質砂岩	すべり面	No. 4-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	26.9
			凝灰岩	すべり面	No. 4-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	44.0
	No. 5	虎毛山層	砂質泥岩	すべり面	No. 5-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	48.3
			砂質泥岩	すべり面	No. 5-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	42.7
	No. 6	古口層	砂質泥岩	すべり面	No. 6-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	45.5
			砂質泥岩	すべり面	No. 6-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	25.5
新第三紀 中新世 後期	No. 7	女川層	砂質凝灰岩	すべり面	No. 7-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	66.9
			砂質凝灰岩	すべり面	No. 7-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	18.2
	No. 8	女川層	凝灰岩	すべり面	No. 8-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	58.4
			凝灰岩	すべり面	No. 8-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	85.2
	No. 9	女川層	灰白色凝灰岩	すべり面	No. 9-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	31.1
			凝灰岩	すべり面	No. 9-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
新第三紀 中新世 後期	No. 10	女川層	凝灰岩	すべり面	No. 10-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
			凝灰岩	すべり面	No. 10-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	No. 11	須郷田層	凝灰岩	すべり面	No. 11-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
			凝灰岩	すべり面	No. 11-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	No. 12	大荒沢層	凝灰岩	すべり面	No. 12-1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
			凝灰岩	すべり面	No. 12-2	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-

凡例	Sm : スメクタイト	Qtz : 石英
	I/S : イライト/スメクタイト混合層鉱物	Pl : 斜長石
	Chl : 緑泥石	Zeo : 沸石
	Kao : カオリン鉱物	

表-2.2 イライトの鉱物学的特性評価

地質年代	地すべり番号	地層名	岩相	すべり面の 性状	試料番号	I or I/S	Ir	d (004)	BB1, BB2	膨潤層割合	積層パターン
新第三紀 鮮新世	N0. 1	天徳寺層	シルト質凝灰岩	すべり面	N0. 1-1	Illite	1.19	×	<4°	15%未満	IS +I
			シルト質凝灰岩	すべり面	N0. 1-2	Illite	1.32	×	<4°	15%未満	IS +I
新第三紀 中新世 後期	N0. 2	船川層	黒色泥岩	すべり層	N0. 2-1	Illite	-	-	-	-	-
	N0. 3	野口層	黒色泥岩	すべり面	N0. 3-1	Illite	1.60	×	<4°	15%未満	IS +I
	N0. 4	野口層	凝灰質砂岩	すべり面	N0. 4-1	Illite	-	-	-	-	-
	N0. 5	虎毛山層	凝灰岩	すべり層	N0. 5-1	Illite	1.44	×	>4°	15~50%	IS+I
	N0. 6	古口層	砂質泥岩	すべり面	N0. 6-1	Illite	1.91	×	>4°	約15%	IS+I
			砂質泥岩	すべり面	N0. 6-2	Illite	1.24	×	<4°	15%未満	IS +I
新第三紀 中新世 中期	N0. 7	女川層	シルト質凝灰岩	すべり面	N0. 7-1	-	-	-	-	-	-
			シルト質凝灰岩	すべり面	N0. 7-2	-	-	-	-	-	-
			凝灰岩	すべり層	N0. 7-3	-	-	-	-	-	-
			黒色泥岩	すべり面	N0. 7-4	-	-	-	-	-	-
	N0. 8	女川層	灰白色凝灰岩	すべり層	N0. 8-1	-	-	-	-	-	-
	N0. 9	女川層	珪質泥岩	すべり層	N0. 9-1	-	-	-	-	-	-
新第三紀 中新世 前期~中期	N0. 10	女川層	凝灰岩	すべり面	N0. 10-1	-	-	-	-	-	-
			凝灰岩	すべり面	N0. 10-2	-	-	-	-	-	-
	N0. 11	須郷田層	凝灰岩	すべり層	N0. 11-1	I/S	1.26	×	-	5~10%	Random
	N0. 12	大荒沢層	凝灰岩	すべり層	N0. 12-1	-	-	-	-	-	-

(3) イライトの鉱物学的特性評価

イライトは、四面体と八面体の各々が二次元的なつながりをもった四面体シートと八面体シートが、2:1の比で積層している雲母粘土鉱物である(図-2.2)。この八面体内部の陽イオンはアルミニウムイオンからなり、鉄分を含む海緑石やセラドナイトとは区別される。八面体シートは3個で一つのユニットをなしており、シート内部には3カ所の陽イオン位置が存在する。この3カ所ある陽イオン位置のうち、イライトは2カ所のみを満たしている(2八面体型)。イライトは過剰の負電荷をもっていることから電気的な中性を保つため、主として層間に交換性の陽イオンを挟んでいる。この交換性陽イオンは通常カリウムイオンからなるが、アンモニウムイオン、ナトリウムイオンのときもありアンモニウムイライトとよばれ区別される。天然のイライトは単独で存在することは稀で、通常スメクタイトとよばれる膨潤層と混合層をなすかあるいは混在している。したがって、イライトは、(1) 純粋なイライト、(2) イライト/スメクタイト混合層鉱物 (I/S)、(3) (1) と(2)の混合物、のうちのいずれかの形態をとっている。

X線回折分析により得られた回折線図を用いて、イライトの鉱物学的特性を評価した。評価方法は、Srodon and Eberl⁹⁾によった。

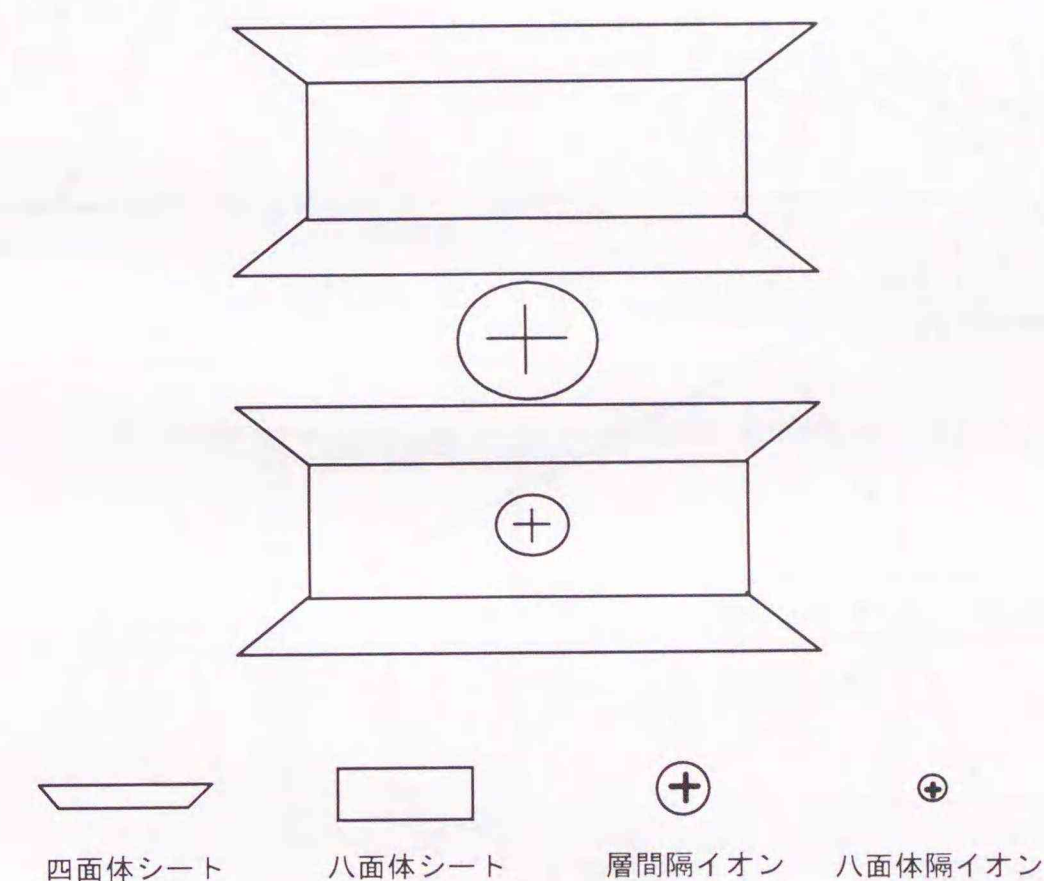


図-2.2 イライトの単位構造

①Srodon and Eberl(1984)⁹⁾の評価法

この評価法は、イライト/スメクタイト混合層鉱物の存在の有無および膨潤層割合と積層パターンを評価するものである。膨潤層つまりスメクタイトの存在は、パラメーターIrによって明らかにされる。図-2.3に評価のフローチャートを示す。

評価結果を表-2.2に示す。新第三紀中新世後期～鮮新世の試料はイライト領域にプロットされ、中期から後期の試料はいずれもイライト/スメクタイト領域にプロットされた。また、d(004)、BB1、BB2では、すべてイライト/スメクタイト混合層鉱物に判別された。イライト/スメクタイト混合層鉱物の膨潤層割合はその多くが15%未満であり、積層パターンはISII+IもしくはIS+Iが多く、Randomも認められた。

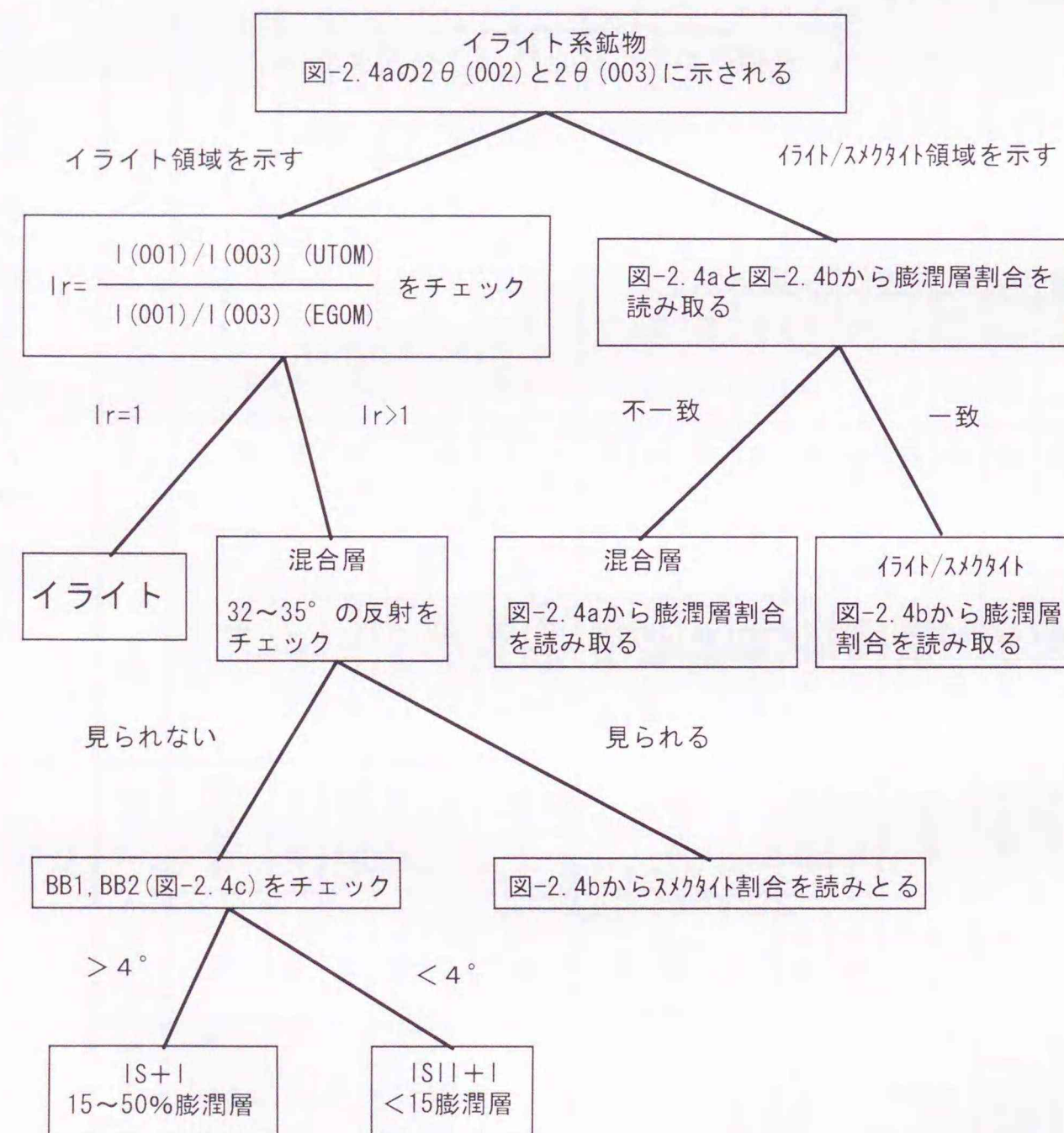


図-2.3 Srodon and Eberl⁹⁾の評価法

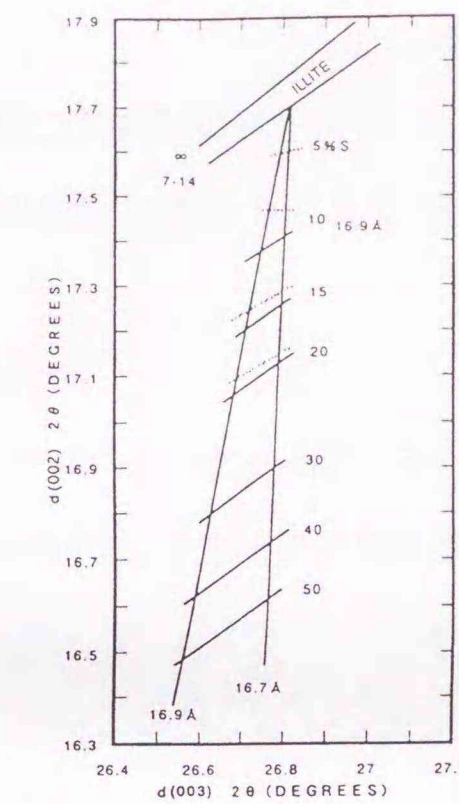


図-2.4a I系とI/S系の判別図

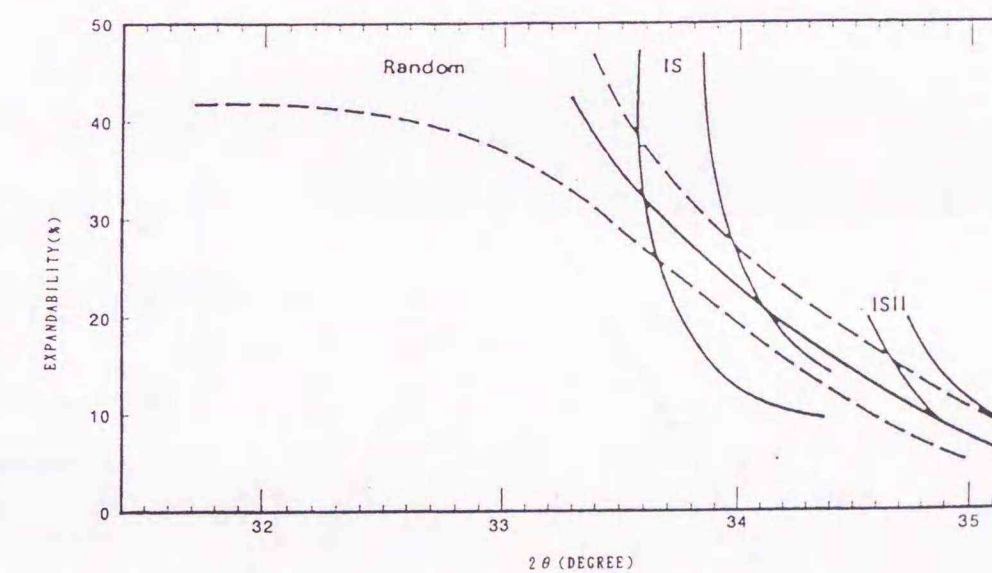


図-2.4b (004)反射によるI/Sの膨潤層割合判定図

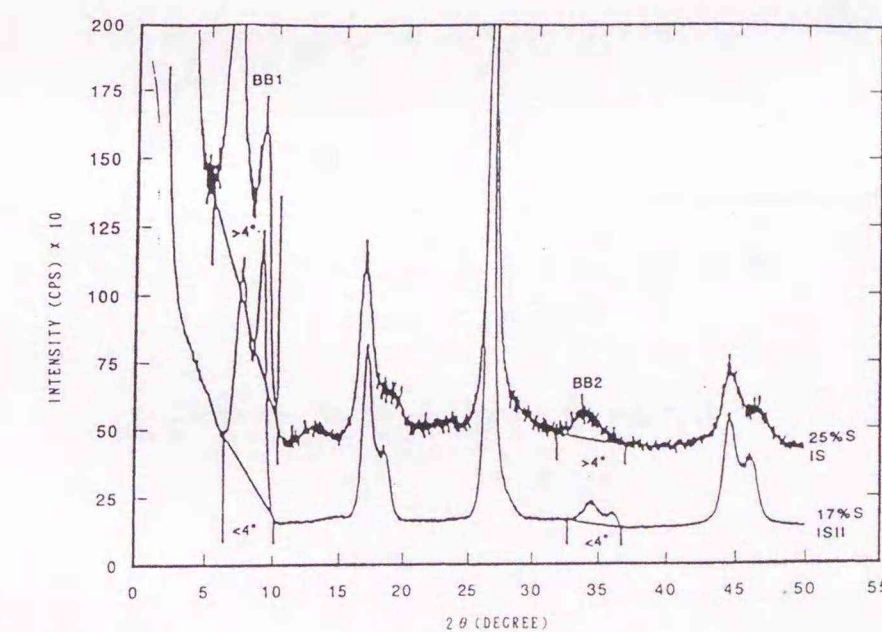


図-2.4c ISとISIIのBBのパラメータ

(4) EPMAによる定量化学分析結果

EPMAによる定量化学分析をNo. 7-1, 8-1, 10-2の3試料について実施した。Si, Al, Feの三角ダイアグラムを図-2.5に示す。三角ダイアグラムでは、3試料ともにモンモリロナイトに近い位置にプロットされている。

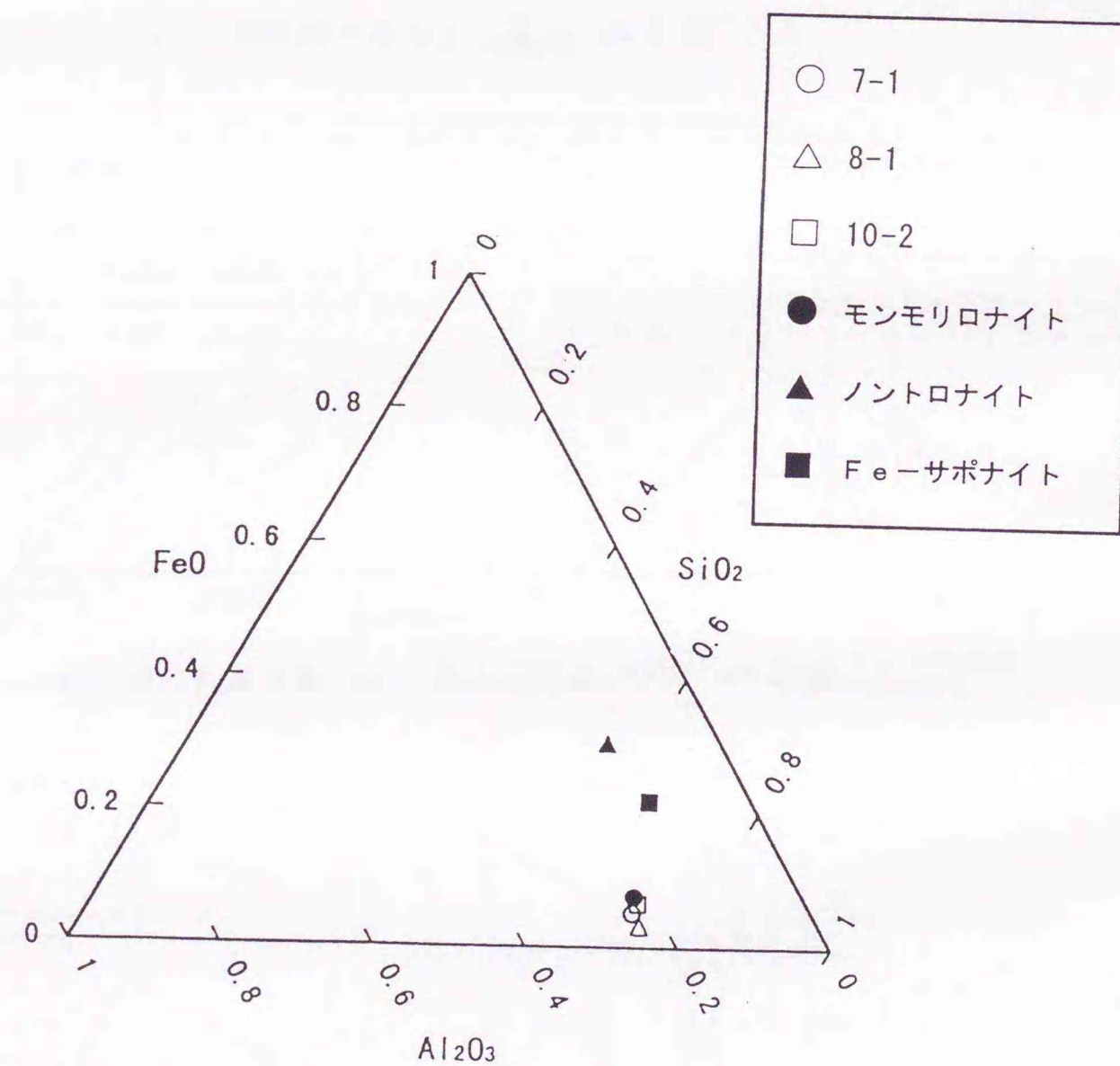


図-2.5 SiO₂-Al₂O₃-FeO ダイアグラム

2.2.2 化学的特性

すべり面粘土の化学的分析結果を表-2.3に示す。

(1) 陽イオン交換容量 (CEC)

表-2.3に示された測定結果より、CEC値は25.8~63.8(meq/100g)であり、スメクタイトが60~100(meq/100g)の範囲にあることから、これに比べると測定値は全体的に低い傾向を示している。

(2) 交換性陽イオン組成

交換性陽イオンは、Na⁺, K⁺の卓越する1価型を示すものと、Mg²⁺, Ca²⁺の2価型とに分かれたが、地質年代との関係は認められない¹⁰⁾。

(3) 懸濁水のpH

懸濁水のpHは、pH2.55~10.27と強酸性からアルカリ性と幅広い分布を示す。なお、中新世中期の試料のpHは全て酸性を示している。

表-2.3 第三紀層地すべりのすべり面（層）粘土の分析結果（化学的特性）

地質年代	地すべり名称	地層名	岩相	すべり面の 性状	試料番号	CEC[mnaq/100g]	交換性陽イオン				タイプ	懸濁水の pH
							陽イオン組成[%]					
							Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		
新第三紀 鮮新世	N0.1	天徳寺層	シルト質凝灰岩	すべり面	N0.1-1	57.5	7.0	10.3	44.6	38.1	2価型	5.31
	N0.2	船川層	シルト質凝灰岩	すべり面	N0.1-2	48.6	9.1	12.7	43.0	35.2		4.57
新第三紀 中新世 後期	N0.3	野口層	黒色泥岩	すべり層	N0.2-1	57.5	60.2	5.3	10.3	24.2	1価型	10.27
	N0.4	野口層	黒色泥岩	すべり面	N0.3-1	53.3	45.8	11.6	4.5	38.1		10.12
	N0.5	虎毛山層	凝灰質砂岩	すべり面	N0.4-1	57.2	21.5	13.2	25.9	39.3	2価型	5.97
	N0.6	古口層	凝灰岩	すべり層	N0.5-1	25.8	7.2	10.6	10.2	72.1		9.38
			砂質泥岩	すべり面	N0.6-1	—	—	—	—	—	—	—
			砂質泥岩	すべり面	N0.6-2	—	—	—	—	—	—	—
新第三紀 中新世 中期	N0.7	女川層	シルト質凝灰岩	すべり面	N0.7-1	60.1	16.5	8.0	38.6	36.8	2価型	4.55
			シルト質凝灰岩	すべり面	N0.7-2	58.2	10.7	13.7	33.1	42.4		5.36
			凝灰岩	すべり層	N0.7-3	60.5	9.8	10.8	41.6	37.8		2.97
	N0.8	女川層	黒色泥岩	すべり面	N0.7-4	36.1	35.1	23.2	16.6	25.1	1価型	2.55
	N0.9	女川層	灰白色凝灰岩	すべり層	N0.8-1	63.8	1.3	3.2	42.1	53.4	2価型	5.39
	N0.10	女川層	珪質泥岩	すべり層	N0.9-1	30.0	13.9	9.2	32.9	43.9		3.26
		女川層	凝灰岩	すべり面	N0.10-1	—	—	—	—	—	—	—
		女川層	凝灰岩	すべり面	N0.10-2	—	—	—	—	—	—	—
新第三紀 中新世 前期～中期	N0.11	須郷田層	凝灰岩	すべり層	N0.11-1	50.3	15.3	13.5	36.2	35.1	2価型	3.24
	N0.12	大荒沢層	凝灰岩	すべり層	N0.12-1	42.6	49.1	14.5	13.9	22.5	1価型	—

2. 3 岩手県明倉沢古期地すべり地

2.3.1 地すべり地概要

明倉沢地すべり地は、岩手県南西部の北上川水系和賀川の支流である北本内川（北緯39° 20′，東経140° 54′）の左岸に発生した地すべりで、現在は滑動を休止している（図-2.6）。地すべりの規模は、長さ約230m、幅約250m、面積5.8haで、末端付近では現在も北本内川の下刻作用による小規模崩壊が発生している。地すべり土塊はBlock Glide的形態を示し、すべり面の傾斜角度が0°～15°と緩いことから、本地すべりは、原形を保ったままゆっくりと移動したものと考えられる。また、付近の地質は、いわゆるグリーンタフの新第三系中新統大石層であり、酸性凝灰岩、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩、泥岩、安山岩からなる。大石層の火山碎屑岩類は、緑色～淡緑色を呈し、緑泥石化などの軽微な熱水変質を受けている⁸⁾。

明倉沢地すべり地の滑動時期は、すべり面と付近の段丘面との関係から、少なくとも大野台段丘に相当する段丘の形成時期以降であり、小綱木沢段丘に相当する段丘とほぼ同時期かそれ以前と考えられる（表-2.4）。すなわち、すべり面末端部の標高（E.L.=205m）は、対岸の大野台段丘に相当する段丘面の標高（E.L.=212m）より低く、地すべり末端部に分布する小綱木沢段丘に相当する段丘面の標高（E.L.=202m）とほぼ同じである。さらに、後者の段丘面には地すべり末端の二次的な小規模崩壊による土砂の被覆がみられるものの、地すべり土塊本体の被覆は認められない。さらに、崩積土中（深度14.2m）から採取した炭化木の¹⁴C年代値（>26,540B.P.）⁸⁾からも、明倉沢地すべりの滑動時期は第四紀後期更新世と推定される。

表-2.4 北本内川流域の段丘編年表²²⁾

地質時代	年代 (万年)	多摩川における 段 丘 区 分	北本内川、和賀川における段丘区分	
			本 調 査	Toyoshima (1984)
完 新 世	1	千ヶ瀬段丘など	A 段 丘	
		拝島段丘		
更 新 世 後 期	10		LⅢ 段 丘	小 網 木 沢 段 丘
		青柳段丘		
		立川段丘	LⅡ 段 丘	大 台 野 段 丘
		武蔵野段丘		¹⁴ C 18,500±450 22,500±650 >31,270 >32,870
更 新 世 中 期	15	下末吉段丘	M 段 丘	大 荒 沢 段 丘
	20			
	50	多摩段丘	H 段 丘	峠 山 下 位 段 丘 峠 山 下 位 段 丘

すべり面は、単一の面（層）からなり、地すべり背部を高角度の断層に規制された椅子型の形態を呈している。すべり面座部は、地表から約40～65mと深い位置にあり、そこではすべり層が泥岩中の層理面にほぼ沿って形成されている。なお、すべり面は、ボーリングコア観察、横坑調査、空中写真による地すべり地形解析などから決定されたもので、その決定根拠は次のとおりである。

- (1) すべり面は崩積土（岩塊～礫質土砂）下面に位置している
- (2) すべり面は未風化岩盤上面に位置している
- (3) すべり面には連続性の良い軟弱粘土層が存在している
- (4) この軟弱粘土層の傾斜方向は、地すべり地形に対して流れ盤をなしている
- (5) 軟弱粘土層中にはせん断亀裂と推定される多数の亀裂が発達している
- (6) 軟弱粘土層の下部付近には連続性の良い（水平距離約15m）鏡肌が認められる
- (7) この鏡肌の傾斜方向は、地すべり地形の最急勾配方向に一致し、その傾斜角度は基盤の傾斜と平行（12～15°）である。

以上より、古期すべり面は崩積土と未風化基盤岩の境界部に位置し、そこに分布する軟弱粘土層下部付近の鏡肌の発達した面であると決定された。

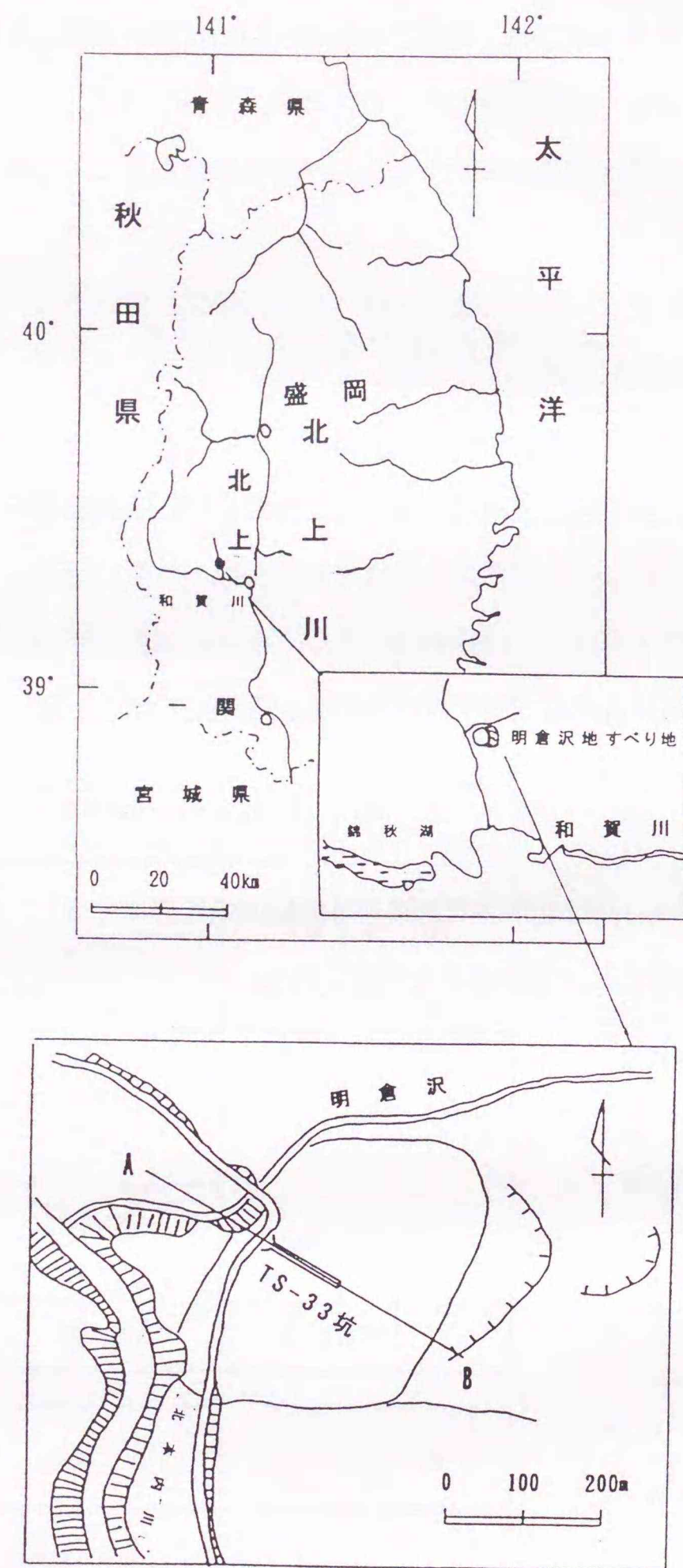


図-2.6 明倉沢地すべり地 (平面図)

2.3.2 すべり層の性状

すべり層は、地すべり土塊内に掘削された調査横坑 (TS-33坑) の側壁において、水平距離約15mにわたり直接観察できる (図-2.7)。写真-2.1に、すべり面を含むすべり層の連続写真を示す。すべり層は、上位の灰色泥岩と下位の黒色泥岩の境界部に認められる層厚10~50cm程度の粘土層である。これら粘土層ならびに上下位の灰色泥岩 (B)、黒色泥岩 (I) 中には、多数の不規則な亀裂が発達し、せん断破壊の過程で生じたせん断破碎帯と考えられる。すべり層中には多数の亜角礫~亜円礫状の泥岩の岩片を包含している。すべり層粘土 (C-H) は、図-2.8のすべり層の産状スケッチに示すように、標準土色表¹¹⁾を基準とした色調をもとに6つのサブゾーン、すなわちCからHにむけ、それぞれ、にぶい黄褐色、山吹色、黄山吹色、褐色、山吹色、茶色によって特徴づけられる粘土層に区分される。ここで主変位せん断面に相当するいわゆるすべり面は、特徴的な褐色を呈するすべり層下部付近のF層であり、その上面には鏡肌が連続して認められる (写真-2.2)。すべり面は、厚さ1cm以下の薄層で、その断面にはラミナ状に重なった構造が認められる。

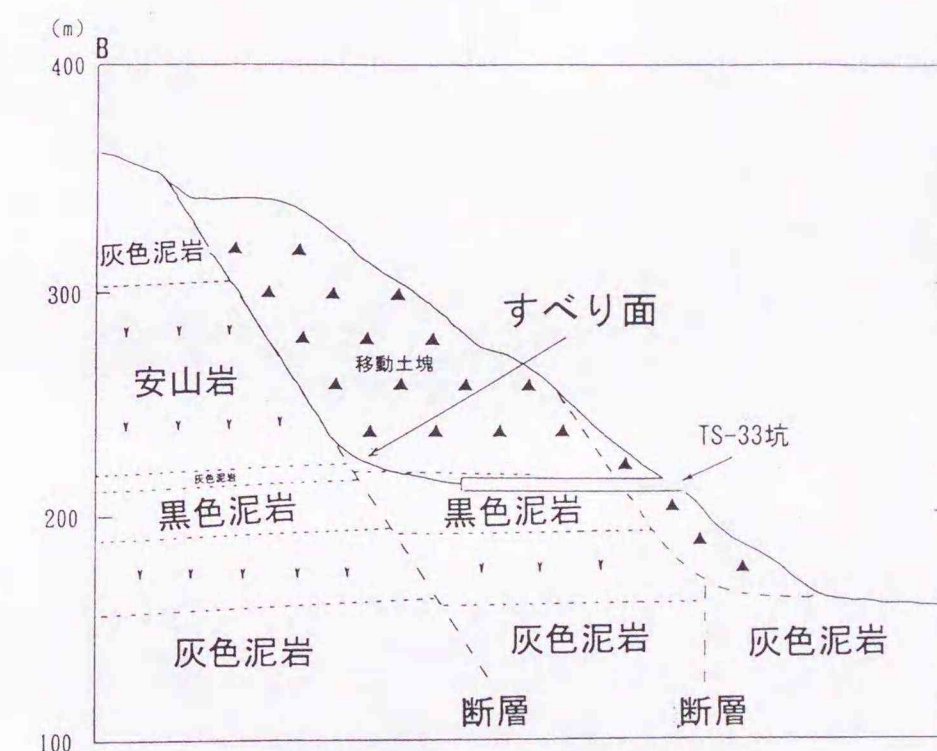


図-2.7 明倉沢地すべり地 (断面図)

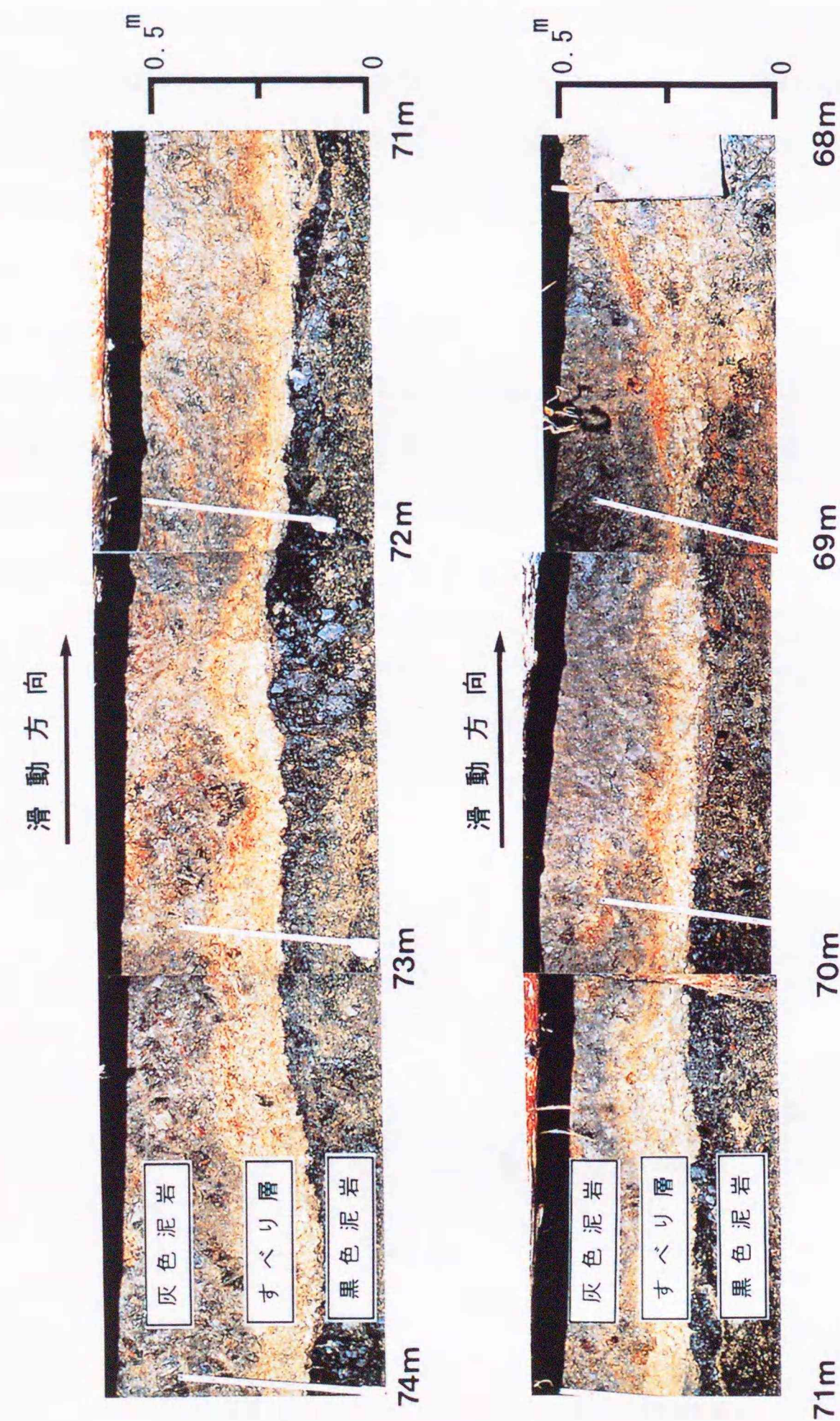


写真-2.1 TS-33 坑内で観察されるすべり層

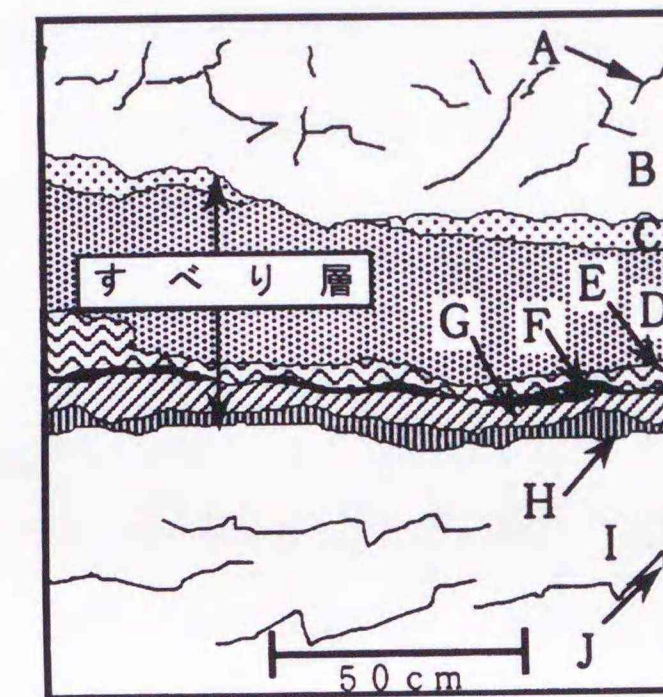


図-2.8 坑深 74-75m のすべり層の産状を示す模式スケッチ
 A: 灰色泥岩の亀裂を充填する風化部分、B: 未風化灰色泥岩、C: にぶい黄褐色粘土泥岩、D: 山吹色粘土質及び礫質泥岩、E: 黄山吹色、F: スリッケンサイドを伴う褐色粘土、G: 山吹色粘土、H: 茶色粘土質泥岩、I: 未風化黒色泥岩、J: 黒色泥岩の褐色風化部分、



写真-2.2 F 粘土層の上面に観察される鏡肌

2.3.3 すべり層粘土の鉱物学的・化学的特性

本節では、地すべり地に掘削された調査横坑(TS-38坑)から採取された岩石および粘土、特にすべり層粘土について、粉末X線回折分析、非晶質成分の定量分析、EPMAによる定量化学分析、および交換性陽イオン分析を行った結果を述べる。

(1) 含水比

すべり層粘土および岩石の含水比を図-2.9に示す。すべり層粘土の含水比(平均値 18.8%)は、灰色泥岩(平均値 8.9%)、黒色泥岩(平均値 4.5%)に比べ高い値を示す。すべり層粘土の中では、すべり面粘土(F粘土)が大きな変動幅を示すものの(標準偏差 $\sigma=4.86$)、最も高い含水比を有している。このことは、滑動中の地すべりにおいて主変位せん断面粘土の含水比が最も高い値を示すこと¹²⁾と同様である。

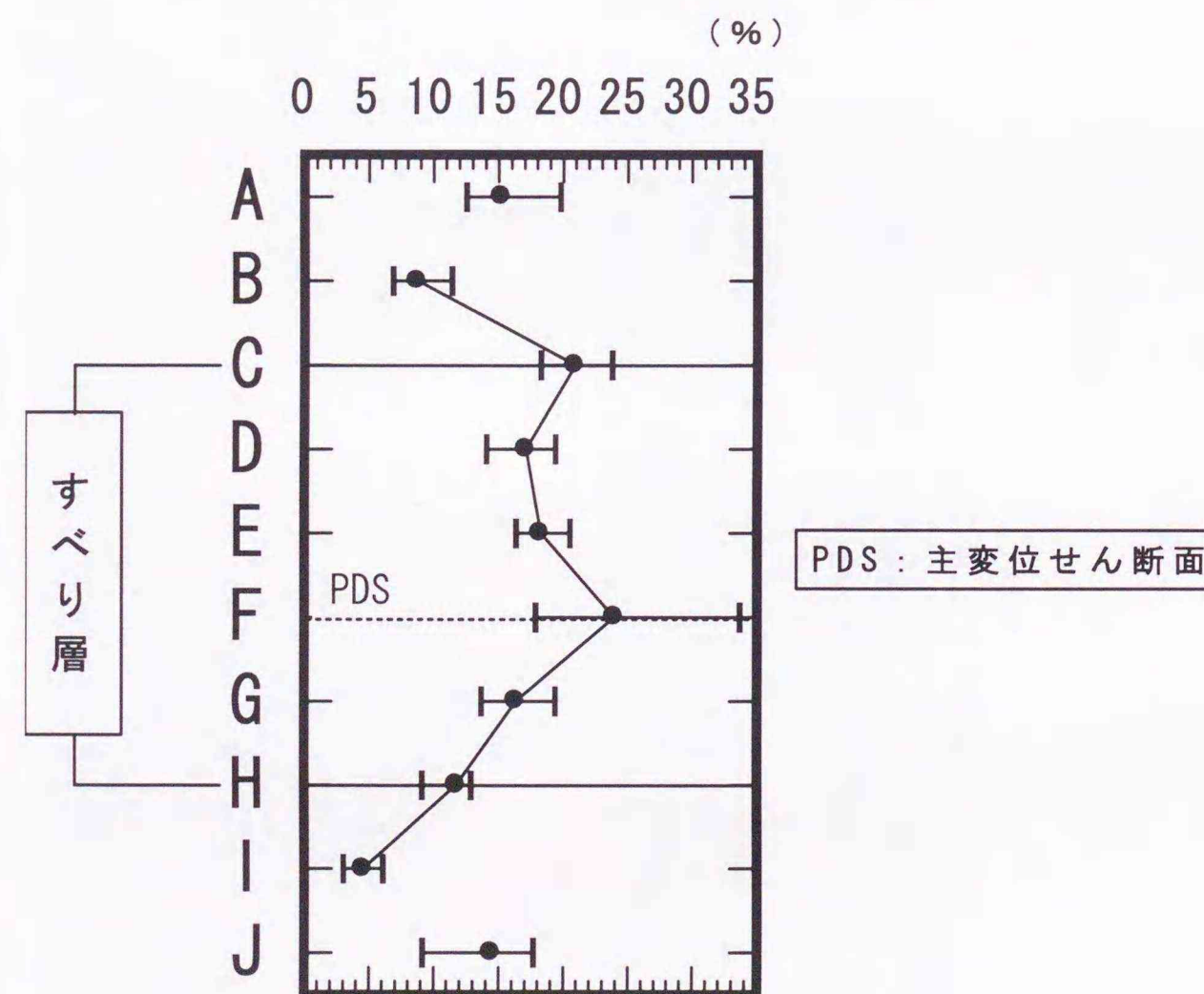


図-2.9 試料(A-J)の含水比

(2) 乾燥密度および間隙率

測定結果を図-2.10に示す。乾燥密度は、灰色泥岩が 2.19g/cm^3 、黒色泥岩が 2.26g/cm^3 であり、すべり層粘土では $1.35\text{--}1.76\text{g/cm}^3$ の値をとる。すべり層粘土の乾燥密度は泥岩に比べ明らかに低い値を示す。また、土粒子密度は、 $2.25\text{--}2.50\text{g/cm}^3$ の範囲にあり、すべり層粘土と岩石の間に大きな差は認められない。そのため、すべり層粘土の間隙率(25.5–43.9%)は、灰色泥岩(8.9%)と黒色泥岩(2.1%)に比べ大きな値を示す。なかでもすべり面粘土の間隙率は43.9%と最大値をとる。

(3) 強熱減量試験

400–800℃の強熱減量割合を図-2.11に示す。すべり層粘土の強熱減量は平均値3.11 wt.% ($\sigma=0.52$)であり、灰色泥岩と黒色泥岩はそれぞれ平均値1.60 wt.% ($\sigma=0.39$)と平均値2.22 wt.% ($\sigma=0.52$)で、前者が高い値を示している。これらの強熱減量は、主に粘土鉱物の構造水の脱水による減量とみなすことができ、粘土鉱物の含有割合の目安になると考えられる。したがって、すべり層粘土の強熱減量が大きいことは、次に述べるX線回折分析結果とあわせて、すべり層中で粘土鉱物の量が増加していることを反映していると考えられる。

(4) 鉱物組成

代表的試料として、すべり層粘土(D粘土)、すべり面粘土(F粘土)、黒色泥岩(I)、灰色泥岩(B)および灰色泥岩中の褐色粘土(A)のX線回折線図を図-2.12に示す。全ての試料から石英、斜長石、緑泥石、イライト、バーミキュライト鉱物および水酸化鉄(レピドクロサイト)が検出された。すべり層粘土中に特徴的に多産するバーミキュライト鉱物は、C、D、E、F、H粘土がバーミキュライト/緑泥石不規則型混合層鉱物であり、G粘土はスメクタイトに近い low chargeバーミキュライトであることが明らかにされている¹³⁾。

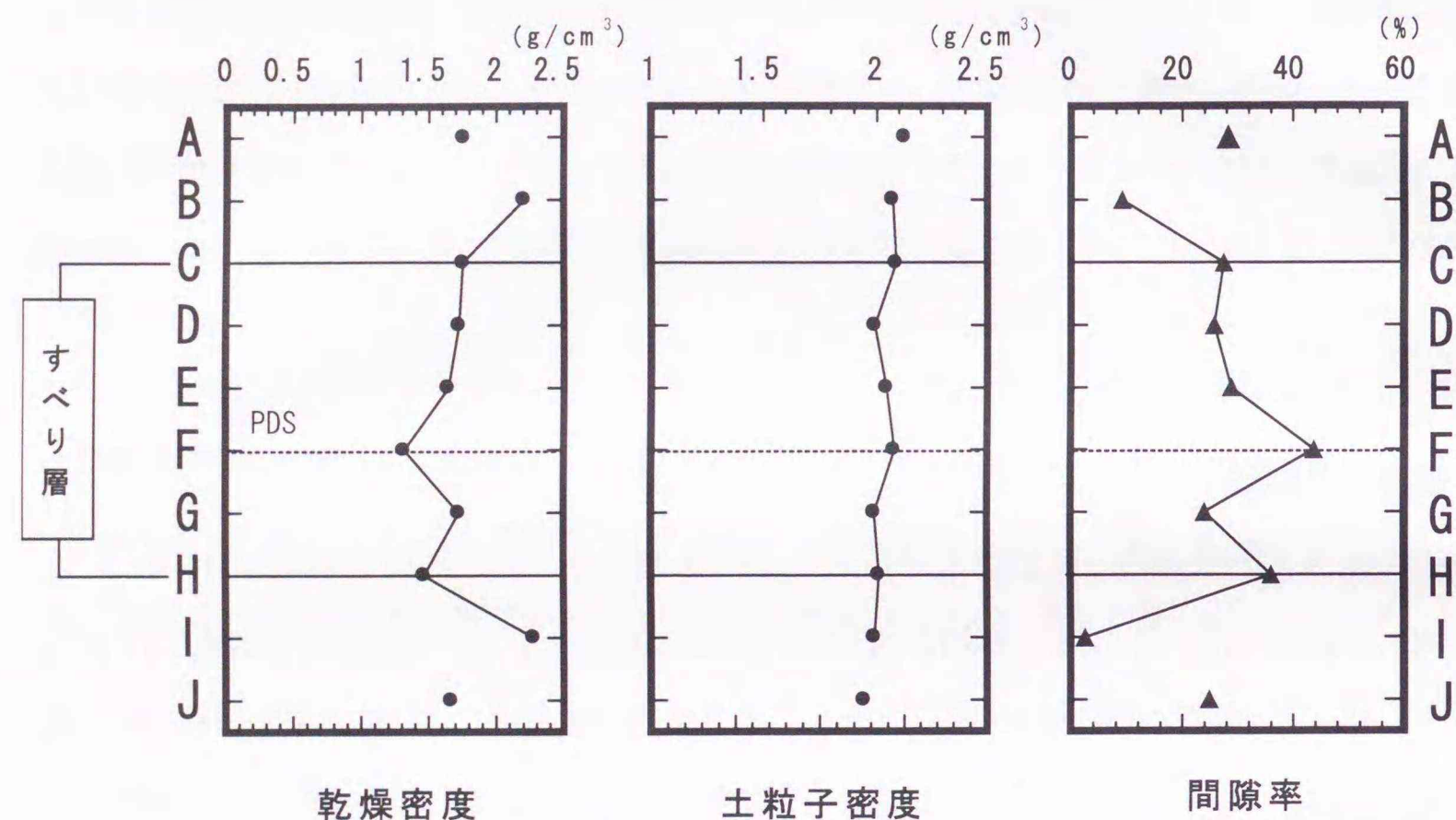


図-2.10 TS-33 坑坑深 72-73m 試料の乾燥密度、土粒子密度および間隙率

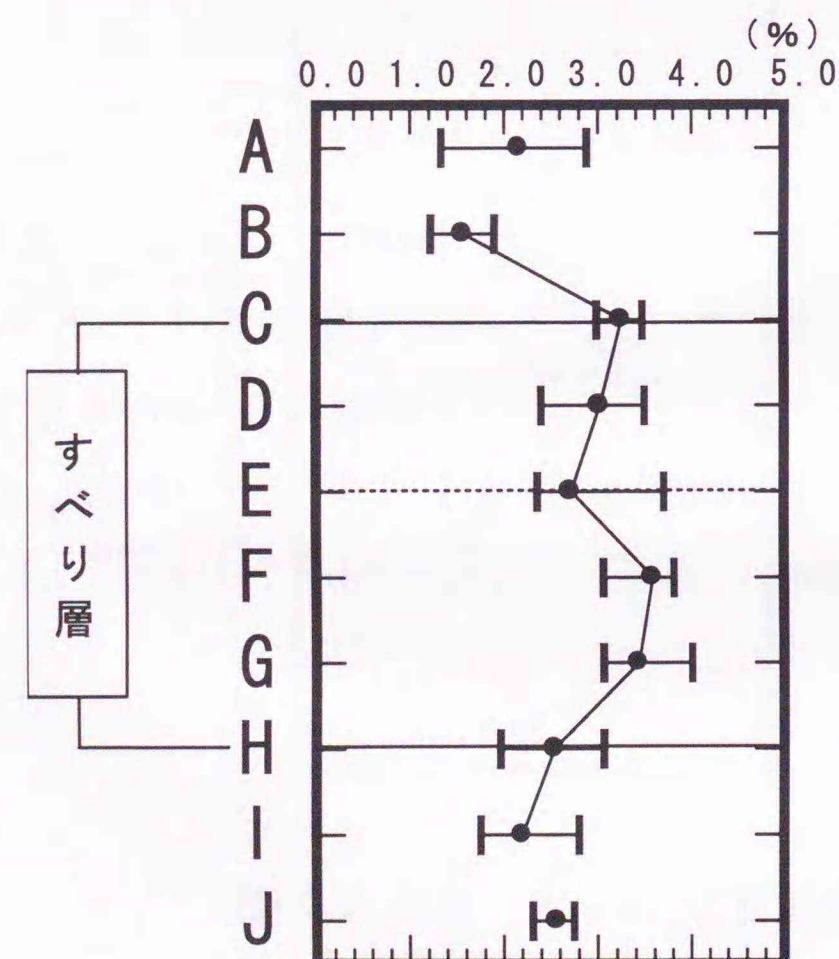


図-2.11 試料の強熱減量 (400-800°C)

(5) 石英指数

図-2.13に、A～Jの主要構成鉱物である石英、斜長石、緑泥石、バーミキュライト鉱物およびイライトの鉱物量の相対的变化を石英指数により示す。石英指数は、試料中の被検鉱物の最強X線強度 I_m (CPS) を、同一条件下で測定した石英100wt.%のX線強度 I_p で除し、百分率で表したものである ($QI = I_m / I_p \times 100$)。そのため、厳密な鉱物量の増減をあらわすものではないが、一つの鉱物について相対的な含有量変化を理解するには十分有効である。石英の指数値は、灰色泥岩、黒色泥岩に比べ、すべり層粘土中で減少する傾向が認められる。また、緑泥石についても変化幅は小さいが類似の傾向が認められる。バーミキュライト鉱物とイライトについても、変化幅は小さいが灰色泥岩と黒色泥岩に比べすべり層粘土中において石英指数の値が増加する傾向が認められる。さらに、それら二つの鉱物について、バーミキュライト鉱物はすべり面粘土より上部の粘土中で石英指数の値が高く、一方、イライトはすべり面粘土を含めて下部の粘土中で値が高い傾向が認められる。粘土鉱物の量的変化はさらに定量的に検討が必要であるが、これら石英指数変化は粘土鉱物の相対量変化を示すものと考えられる。なお、斜長石の石英指数については系統的な傾向は認められない。

(6) 内部標準法による石英の定量

石英含有量の質量割合を図-2.14に示す。試料間での鉱物の含有量の増減を検討するには、厳密には試料の乾燥密度を考慮しなければならない。図中に、質量割合に各試料の乾燥密度を乗じた値 (単位体積を cm^3 とした) をあわせてプロットした。石英の定量値が示すパターンは、石英指数のそれと同様の傾向を示している。

石英はすべり層粘土中 (平均17.9wt.%) において灰色泥岩 (37.0wt.%)、黒色泥岩 (59.9wt.%) に比べ含有割合が小さい。乾燥密度を考慮した結果では、すべり層粘土での乾燥密度が泥岩に比べ小さい値をとるため、石英の減少はより明瞭となっている。すべり層中での石英の減少については、石英は風化に対する抵抗が強く粘土鉱物などへの変質や、また、地下水による溶脱や原位置からの流出によって鉱物量が減少することは考えにくい。すべり層中でせん断破壊に伴う亀裂が著しく発達していること、また、すべり層中の試料で間隙率が増加していることから、石英の鉱物量変化は、むしろ泥岩のせん断破壊時の亀裂 (空隙) の発生による体積増加に起因することが示唆される。すなわち、それらのすべり層中の亀裂 (空隙) には、地すべり滑動後に上部土塊

などから地下水により運搬され、流入した異地性と考えられる粘土が充填し、このことが石英の減少傾向の原因となったものと考えられる。

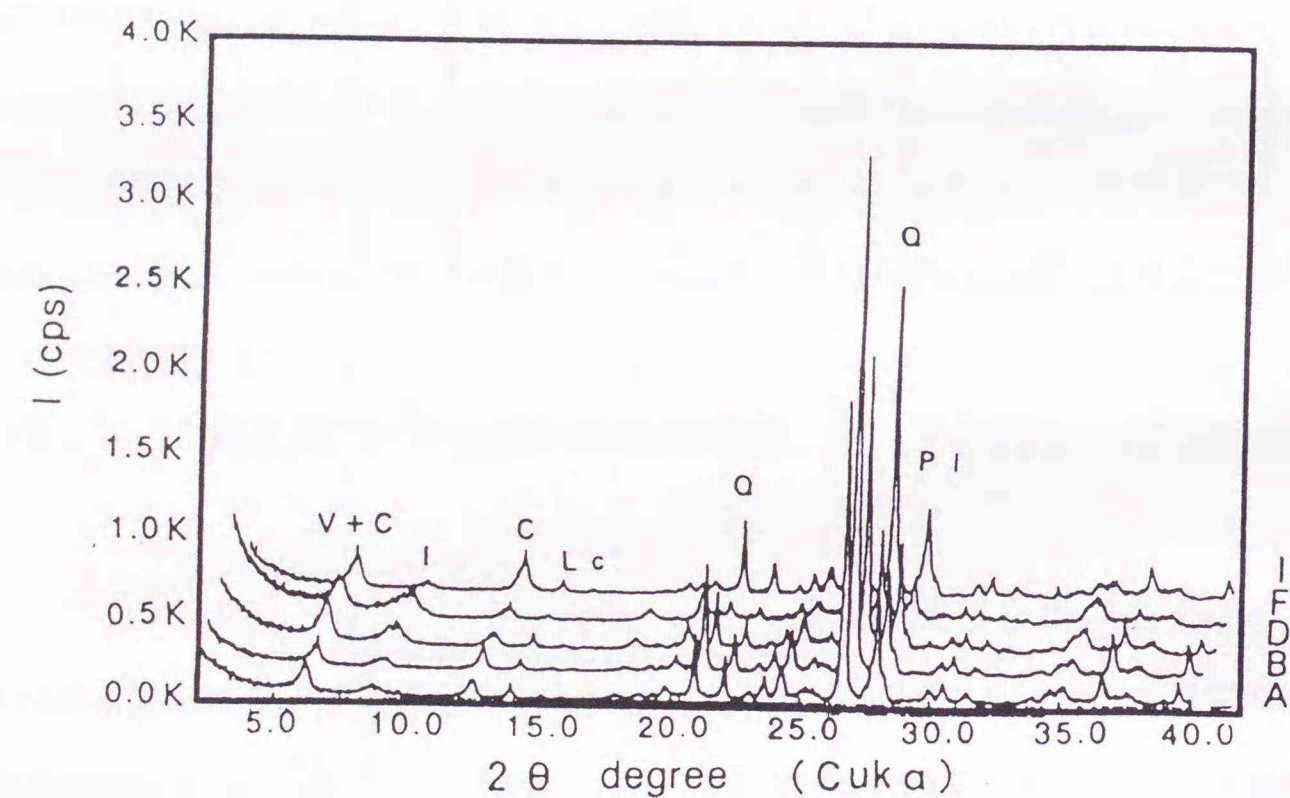


図-2.12 代表試料の粉末X線回折パターン

C : 緑泥岩、I : イライト、V : パーミキュライト鉱物、Q : 石英、
P I : 斜長石、L c : レピドクロサイト

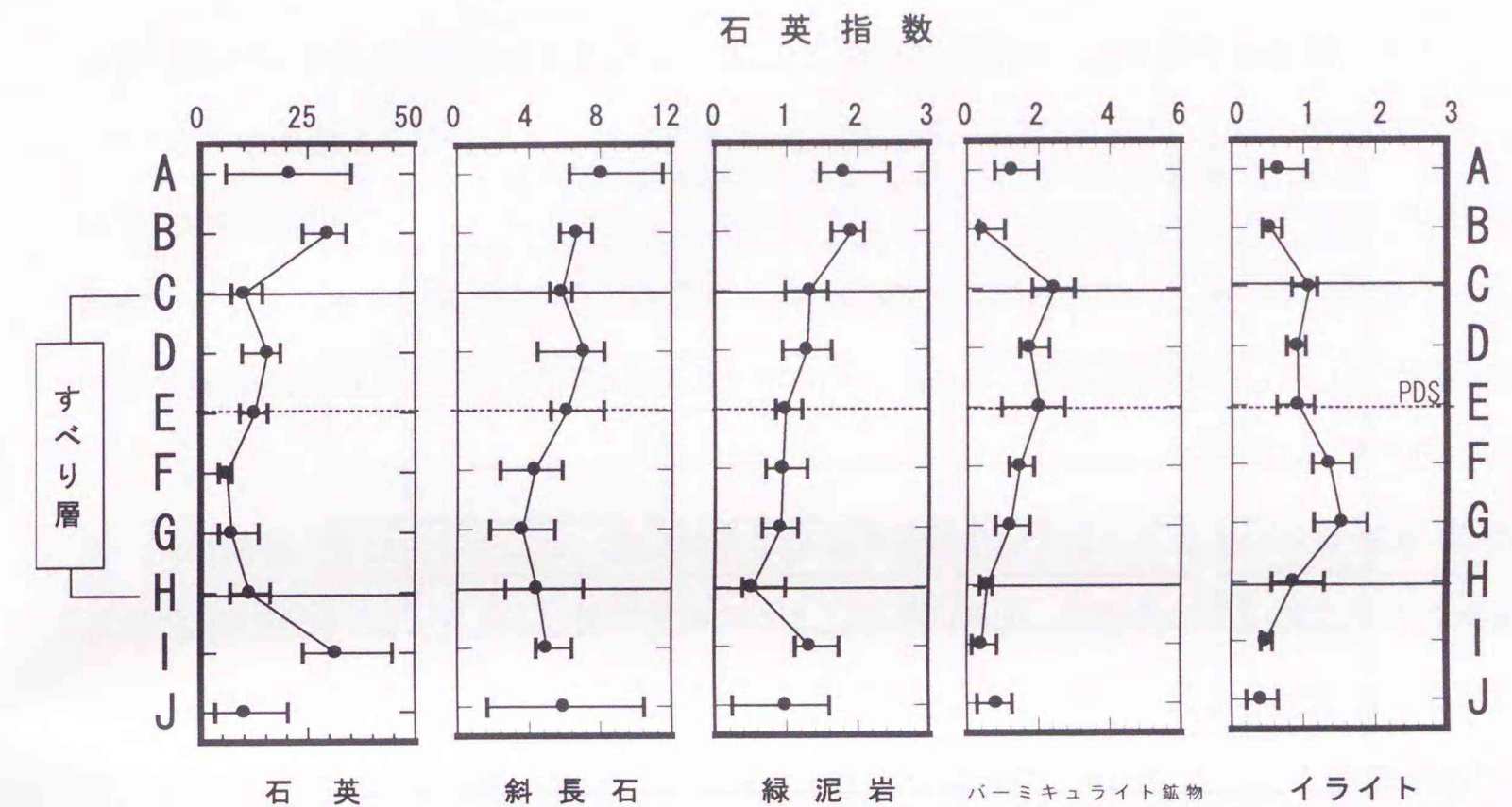


図-2.13 試料構成鉱物の石英指数

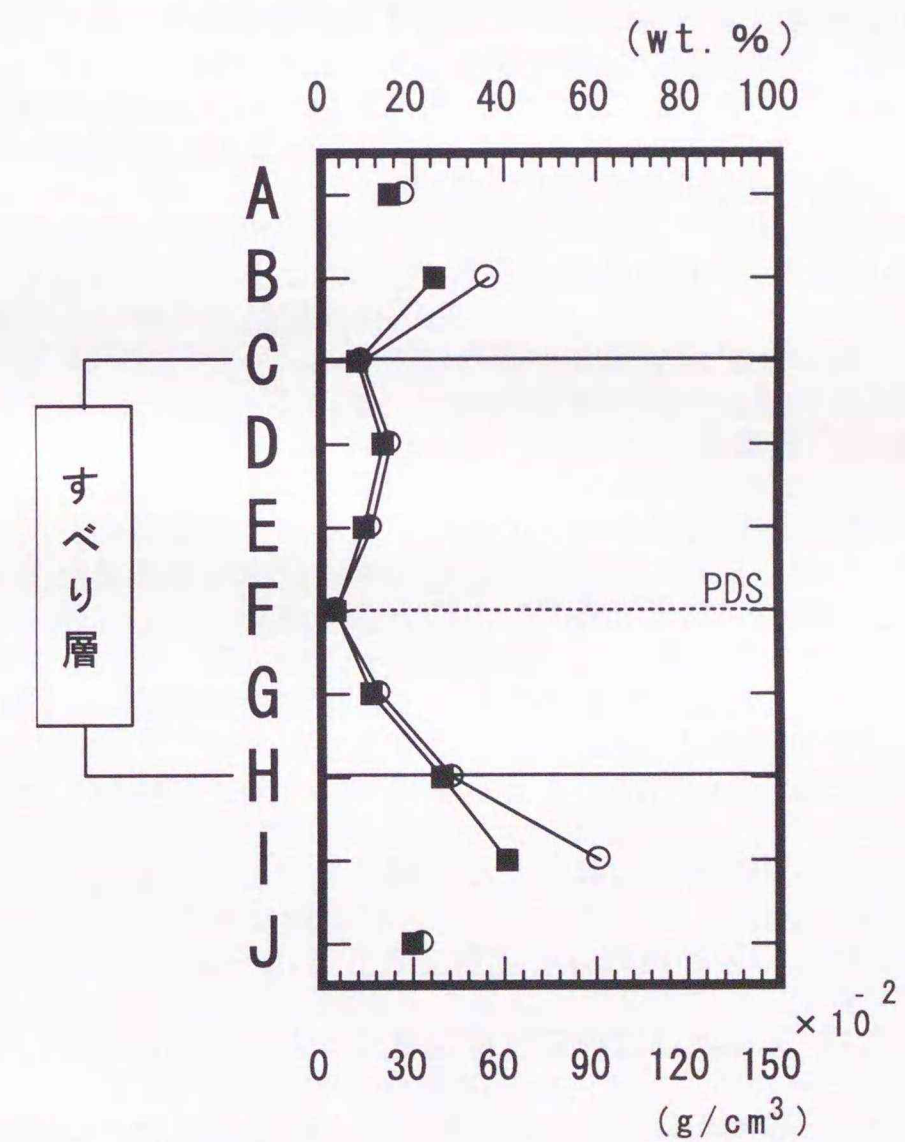


図-2.14 TS-33 坑坑深 72-73m 試料の石英と斜長石の量的変化

(7) 非晶質成分の定性分析・定量分析

フッ化イオンによるアロフェンの簡易判定法¹⁴⁾により非晶質成分の定性分析を行った。その結果、すべり層粘土および岩石試料から非晶質成分が存在することを示唆する結果が得られた。ここで用いた簡易判定法は、遊離OH基の呈色反応を利用する方法であり、その判定結果は、アロフェンやイモゴライトなどの非晶質粘土鉱物のほかに、鉱物の風化変質過程で生じるゲル状物質（風化無機ゲル）などの非晶質成分、さらに結晶性粘土鉱物の端面に存在するOH基の影響を受けているものと考えられる。

そこで、非晶質成分の定量分析を化学的溶解法により行った。ところで、化学的溶解法は、その実験条件や非晶質成分の物理的・化学的性質により溶解量が異なるため、用いる溶解法により非晶質成分の定量値が異なってくる。本研究では、表-2.5に示すように3つの化学的溶解法(NaOH法¹⁵⁾、SEGALEN法^{16), 17)}、TIRON法¹⁸⁾)により定量分析を行い、すべり層粘土に対する適用性についても検討した。なお、これら化学的溶解法の原法では、溶解された処理溶液中のSi, Al, Feの濃度を測定し、これをもとに非晶質成分の含有量を算出している。しかし、この溶出成分を測定する方法は鉱物に含まれる複雑な含水量について考慮する必要があるため、より現実的で簡便な溶解減量を測定する方法が示されている¹⁷⁾。ここでは、初期質量から残留試料の質量を減ずることで溶解質量を求め、これを非晶質成分の含有量とした。

定量分析結果を図-2.15に示す。いずれの方法とも、泥岩およびその割れ目を充填する粘土が、すべり層中のものと比べて低い値を示す傾向が得られている。一方、すべり層中の粘土のなかでは、いずれの方法ともF粘土が最も高い値を示している。

①NaOH法：同法は、分析手順が簡易なのが最大の特徴であるが、非晶質成分のみならず結晶質鉱物の一部まで溶解することが指摘されている¹⁹⁾。この方法の実施前後のX線回折線を比較したところ、回折ピークのプロファイルに変化が認められ、これは結晶質鉱物の一部が溶解したことを示唆しているものと考えられる。この方法による定量値は、今回比較検討した溶解法のなかで最も高く、非晶質成分以外の結晶質鉱物の溶解による影響を受けているものと考えられる。したがって、NaOH法は、すべり層粘土の非晶質成分の定量法としては不適である。

②SEGALEN法：試料を適当な酸-アルカリ溶液で反復処理すると、非晶質成分は結晶性鉱物に比べ溶解速度がはるかに早いため、溶解初期には、非晶質成分と結晶質鉱物の両者により当初溶解量が急激に増加するが、その後は、結晶質鉱物のみの溶解により溶解量は直線的に増加する。SEGA

LEN法はこの原理を利用し、非晶質成分量を求める方法である。

表-2.5 化学的溶解法による非晶質成分の定量分析結果
(wt. %)

	NaOH法	SEGALEN法	TIRON法
A	11.2	4.9	24.4
B	13.3	5.6	7.1
C	10.6	9.8	35.1
D	21.3	14.8	21.5
E	24.4	21.5	23.4
F	40.6	36.3	38.4
G	26.9	21.5	28.6
H	24.5	15.8	30.4
I	17.0	12.3	24.9
J	21.0	16.3	35.2

図-2.16に示すように、試料の溶解による減量曲線は反復処理の2回目以降直線状を呈しており、それ以降試料の溶解量はほぼ一定になっているとみなすことができる。従って、図に一例を示したように、減量曲線の直線部分を処理回数0に外挿して非晶質成分の含有割合を求めた。その結果、すべり層中に少量の非晶質成分が認められ、とくに、すべり面粘土が最も多い含有量を示すことが特徴的である。SEGALEN法は、化学的溶解における結晶質鉱物の影響を考慮している点で、他より優れているが、実験に日数がかかる点が短所である。

③TIRON法：TIRON法は非晶質珪酸塩鉱物の主要な元素に対する選択性が低く、非晶質成分本来の組成を一樣に溶解するため、非晶質成分の溶解法として優れているとされる²⁰⁾。この方法による定量結果は、すべり面粘土で最大値を示すなどSEGALEN法と類似するが、SEGALEN法に比べおよそ2倍の値を示すものがあるなど大きな非晶質成分含有量を示している(表-2.5)。また、同一試料について得られた分析値は大きな変動幅を示す。これらは、微量試料の秤量精度の問題や、遠心分離後上澄み液とともに残留試料が流出するなどの分析操作上の問題に起因するとみられる。従って、TIRON法の化学的溶解法に準拠した簡略法は、すべり層中の非晶質成分の定量法として不適である。

以上より、非晶質成分の定量法としては、簡易でしかもデータの再現性がよいSEGALen法が実用的であると考えられる。

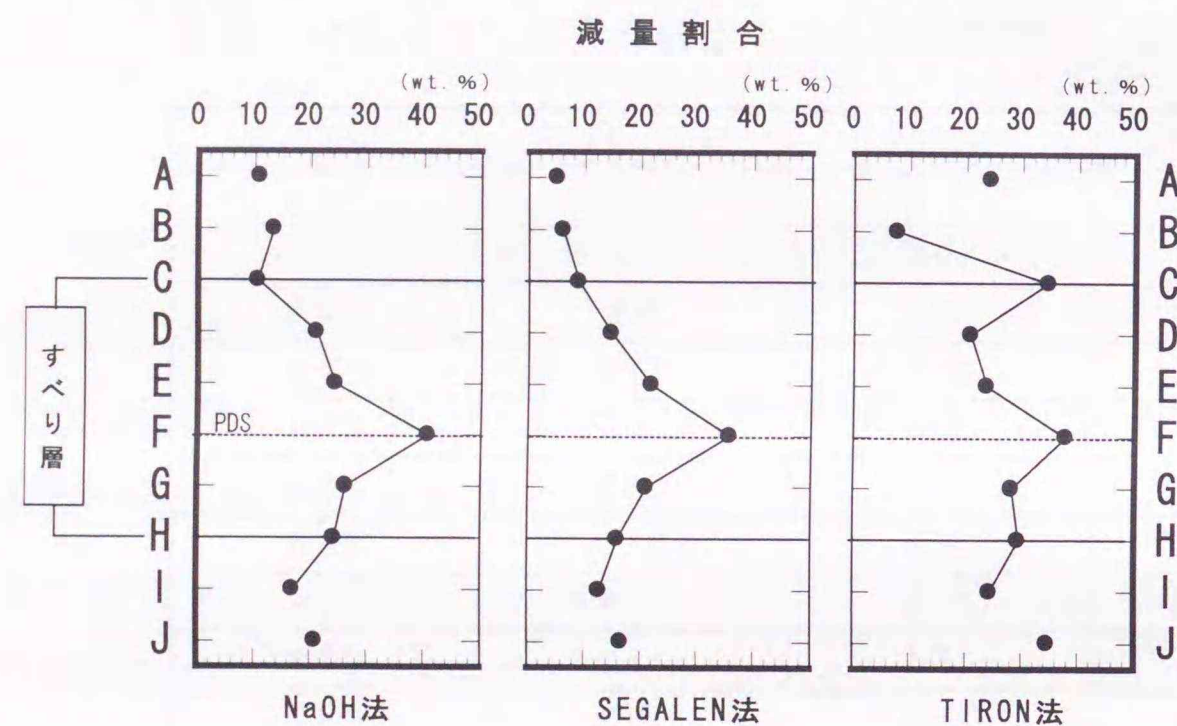


図-2.15 TS-33 坑坑深 75-76m 試料に含まれる非晶質成分の定量分析結果の比較

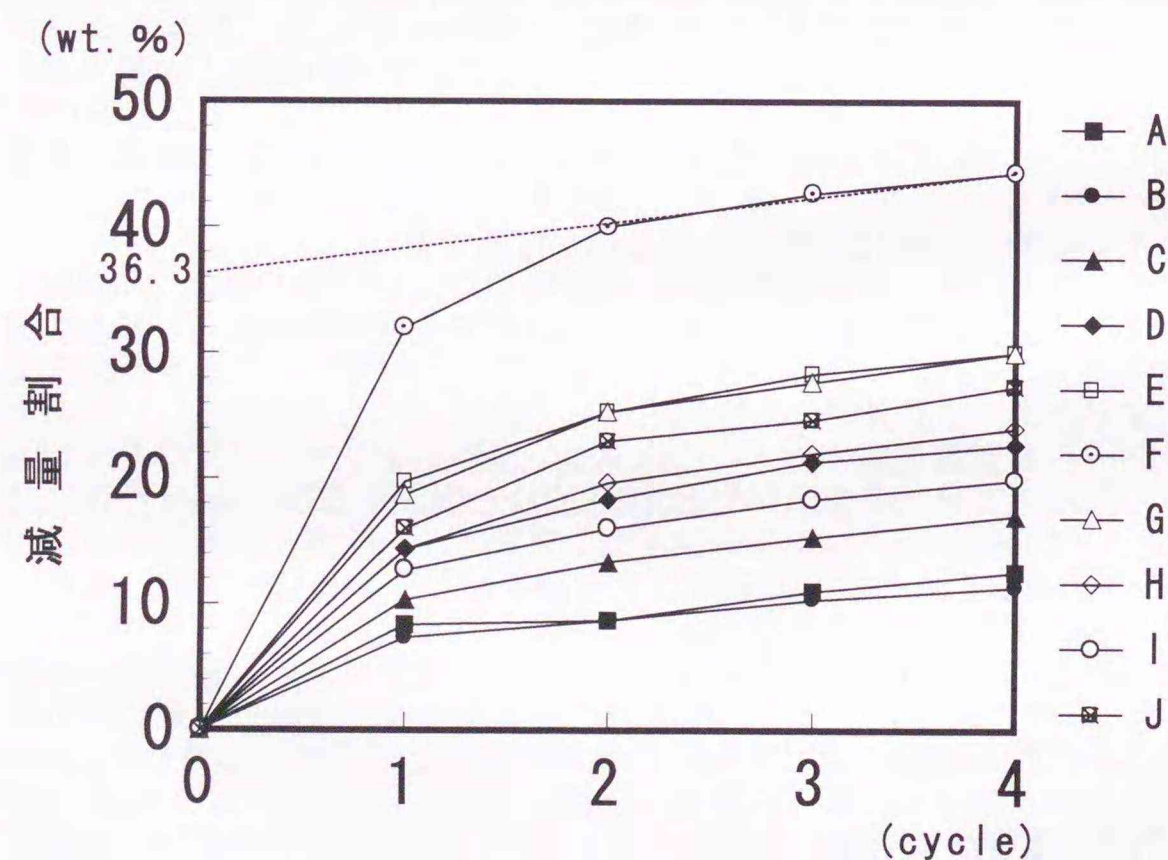


図-2.16 セガレン法により処理した試料の減量曲線

(8) EPMAによる定量化学分析

全岩試料の定量化学分析をEPMAにより行った。分析用試料は、試料粉末0.03gを10t/cm²の圧力で一軸圧縮(30秒間)し作製した。分析は、加速電圧15kV、試料電流0.01μAの条件で面分析により行った。すべり層粘土および岩石試料の化学組成の定量分析結果を表-2.6に示す。なお、鉄分は全てFeOとして表わされている。この質量割合に試料の乾燥密度を乗じた値を図-2.17に示した。X線回折より、泥岩とすべり層粘土中で鉱物量が変化する石英と粘土鉱物の主成分であるSiO₂とAl₂O₃について、SiO₂はすべり層粘土中で著しく減少し、Al₂O₃は逆に増加する傾向が認められる。さらにすべり層粘土の中では、すべり面粘土のSiO₂が特に低い値をとることが特徴的である。また、一般に風化状態を特徴づけられると考えられる鉄分(FeO)については、すべり面粘土において減少する傾向が認められる。

SiO₂の増減は、X線回折分析から求められた石英の含有量変化と同じ傾向を示しており、主として試料中の石英の含有量変化を表していると考えられる。また、すべり層粘土でのAl₂O₃の増加は、先に述べた強熱減量試験結果と調和的であり、すべり層粘土における粘土鉱物量の増加を表しているものと考えられる。

(9) 陽イオン交換容量(CEC)および交換性陽イオン組成

水簾試料のCECおよび交換性陽イオン分析結果を図-2.18に示す。

すべり層粘土のCECの値は、43.2~57.2meq/100gの範囲にあり、黒色泥岩(36.7meq/100g)や灰色泥岩(27.2meq/100g)よりも高い。さらに、すべり層粘土のなかで、すべり面下部のF、G、Hが45.3~57.2meq/100gの範囲にあり、すべり面より上部のC、D、E粘土は40.5~44.4meq/100gであり、明らかに下部粘土のCECが高い。とくに、すべり面粘土(F粘土)が57.2meq/100gとすべり層粘土のなかで最大値を示すこと、また、それが最も大きな非晶質成分含有量を有することが特徴的である。

交換性陽イオンの構成比は、すべり層粘土および黒色泥岩と灰色泥岩のいずれの試料についても、Ca²⁺が最も高く(62.8~72.1%)、Mg²⁺がそれに次いでいる。K⁺とNa⁺の構成比は低く、いずれの試料もおおむね10%以下である。

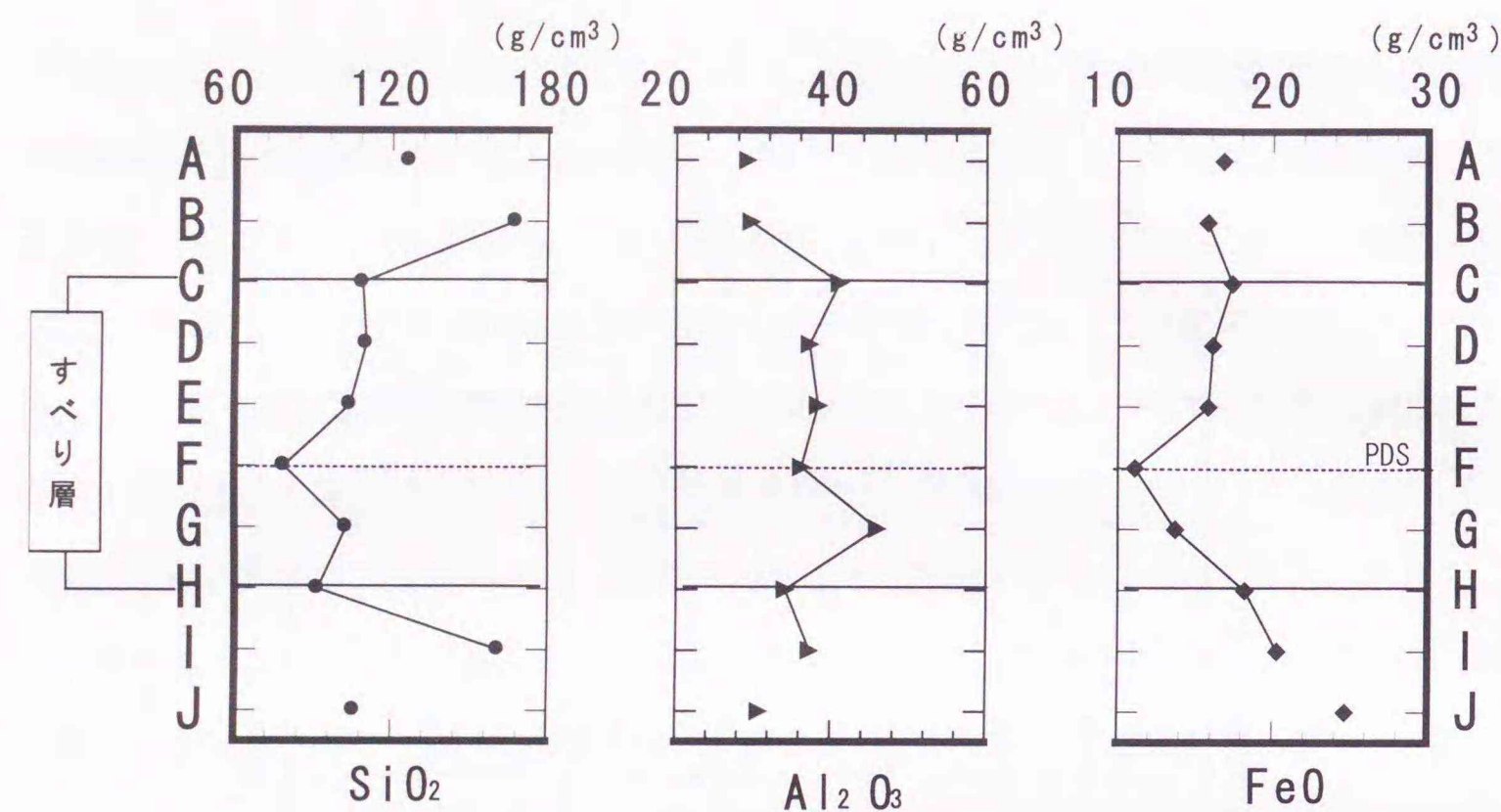


図-2.17 坑深 72-73m 試料の SiO_2 、 Al_2O_3 と FeO 含有量の変化

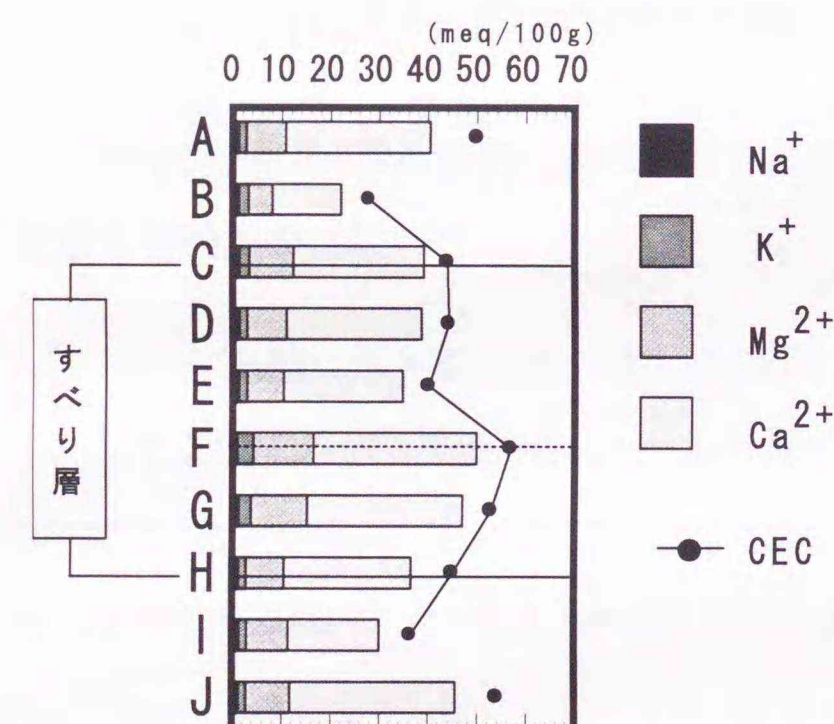


図-2.18 坑深 72-73m 試料の CEC と交換性陽イオン

表-2.6 EPMAによる定量分析結果

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
A	71.1	0.4	16.5	9.6	0.3	3.5	0.4	0.3	0.6	0.2
B	76.8	0.3	13.7	7.2	0.2	2.8	0.4	0.3	0.5	0.2
C	62.4	0.6	23.2	9.9	0.3	4.2	0.6	0.2	1.2	0.4
D	64.6	0.5	21.9	9.5	0.3	4.2	0.6	0.2	1.1	0.4
E	63.1	0.5	22.9	9.5	0.4	4.1	0.5	0.2	1.2	0.3
F	58.5	0.9	26.8	8.3	0.3	4.0	0.7	0.1	1.5	0.2
G	59.6	0.8	26.3	8.0	0.4	4.0	0.6	0.1	1.5	0.1
H	61.4	0.8	22.7	12.1	0.4	3.6	0.5	0.2	1.3	0.3
I	71.4	0.5	16.0	9.0	0.4	4.3	0.5	0.3	0.6	0.1
J	63.6	0.6	18.5	14.8	1.1	3.8	0.5	0.2	0.8	0.1

2. 4 岩手県コシタキ沢古期地すべり地

2.4.1 地すべり地概要

コシタキ沢地すべり地は、明倉沢地すべり地より約500mほど北本内川下流の右岸側に発生した地すべりである。地すべりの規模は、長さ約386m、幅約220m、面積約8.5haで、地形形態から4ブロックに区分される(図-2.19)。ブロック1は、初生的に滑動した斜面崩壊地で、斜面最上部から発生した細長い舌状地形を示す崩壊地である。移動土塊は、崩壊性堆積物の土砂(礫混じり粘土)であることから、滑動様式は急激かつ破壊的なものであったと考えられる。ブロック2は、そのブロック1から二次すべりを起こしたもので、コシタキ沢地すべり地の主ブロックとなっている。ここには連続性の良いすべり面が形成され、鏡肌の発達した青灰色粘土が認められる。現在は、中央の支沢の浸食により土塊が2分割されている。ブロック3は、ブロック1の末端が崩壊してブロック2に載ったものであり、ブロック4は、ブロック2の末端が北本内川の下刻により不安定化して崩壊したものである。このように本地すべり地は、少なくとも4回の滑動経験を有し、ブロック2以外は全て斜面崩壊である。ブロック2の滑動様式は、本ブロックが明瞭なすべり面を有していることから本質的には地すべりに分類される。しかし、平均傾斜角 20.0° と急峻な斜面に発生し、加えて、すべり面直上の移動土塊が波状を呈して積層していることから移動速度が速かったことは明らかで、この点では地すべり性崩壊¹⁾あるいは高速地すべり^{2,1)}とすべきものである(図-2.20)。地すべり性崩壊とは、斜面崩壊と地すべりとの中間的な現象を示すもので、基盤との境界にすべり面があり、この面を境にして土塊が移動するという点、滑動するときには粘土または粘土化しやすい岩石が関係するという点で地すべりとして取り扱うべきものである。しかし、急斜面で発生するため移動速度が速く土塊が攪乱されるなど崩壊の様相も合わせもっている。また、ボーリング調査と横坑調査から明らかにされた基盤までの深度は、ブロック1が20～25m、ブロック2が20～40m、ブロック3が約10m、ブロック4が約40mとやや浅いものである。以上より、コシタキ沢地すべり地は、移動土塊の比較的薄い”速いすべり”であり、明倉沢地すべり地の”緩慢なすべり”とは対照的である。

また、付近の地質は、新第三系中新統大石層の酸性凝灰岩、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩、泥岩、

安山岩が分布し、地すべり方向に対して流れ盤となっている。

本地すべり地の滑動時期は、移動土塊の到達高度と段丘面との関係ならびにすべり面高度と段丘面の高度との関係、から次のように推定される。北本内川流域の段丘は、その高度から5つに区分されている(表-2.4)²²⁾。これら段丘とコシタキ沢地すべり地との位置関係から、ブロック1は、崩壊土砂がII段丘面(峠山段丘に対比)より低いところまで到達しているので少なくともII段丘形成後に発生したものであり、さらに崩積土末端の高度がIII段丘面に近いことから15万年前のある時期に発生したものと推定される。ブロック2は、末端部の高度が対岸のA段丘面の高度にほぼ一致することから、滑動時期は数千年前であり、ブロック3とブロック4は、どちらもブロック2の滑動以後のものであることから、完新世以降の比較的新しいものである。

なお、本論で対象とする斜面変動は地すべりであるため、以後、ブロック2の地すべりに関する検討結果のみを述べる。

ブロック2のすべり面は、基盤の泥岩との層理面にほぼ沿って形成されており、その深度は20～40mである。なお、すべり面は、ボーリングコア観察、横坑調査、空中写真による地すべり地形解析などから決定されたもので、その決定根拠は次のとおりである。

- (1) すべり面は崩積土(礫質～粘土質土砂)下面に位置している
- (2) ここには明瞭な主変位せん断面、副変位せん断面、リーデルせん断面、スラストせん断面が形成されている
- (3) 主変位せん断面には、連続性の良い軟弱粘土薄層が存在している
- (4) この軟弱粘土薄層の上面には鏡肌が発達している
- (5) 鏡肌の傾斜方向は、地すべり地形の最急勾配方向に一致し、その傾斜角度は基盤の傾斜と平行である。

以上より、すべり面は崩積土と未風化基盤岩の境界部に位置する鏡肌の発達した面であると決定された。

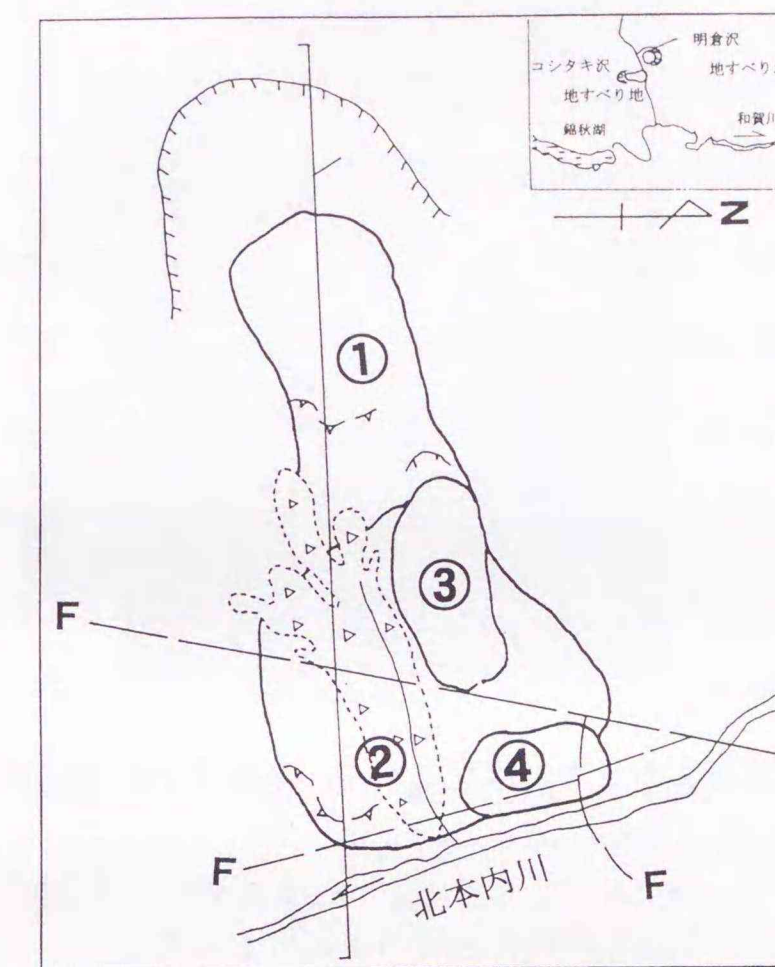


図-2.19 コシタキ沢地すべり地(平面図)

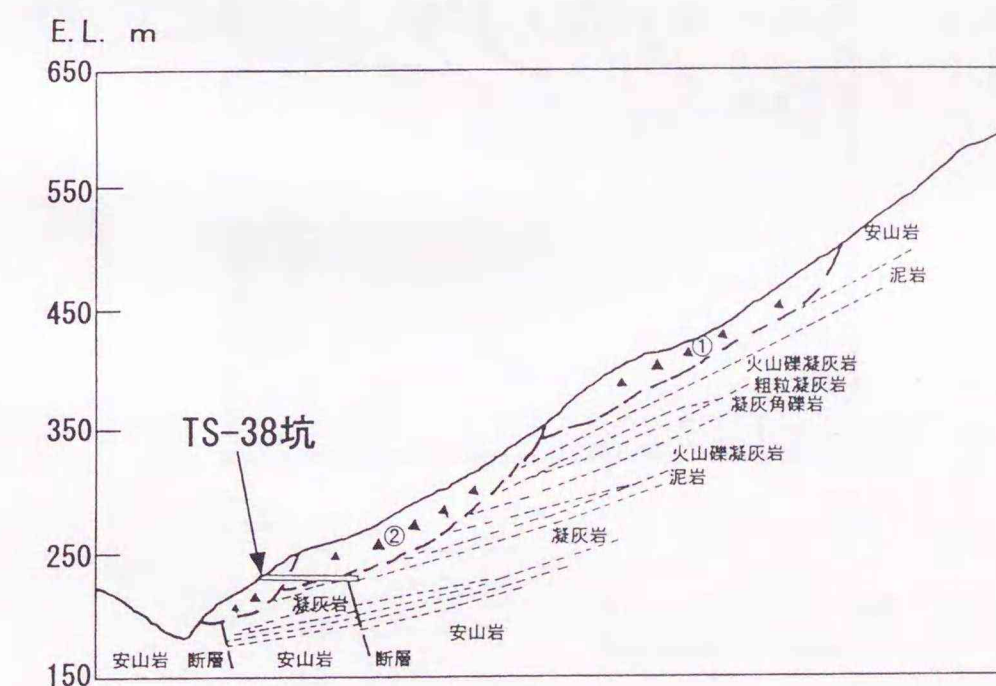


図-2.20 コシタキ沢地すべり地(断面図)

2.4.2 すべり層の性状

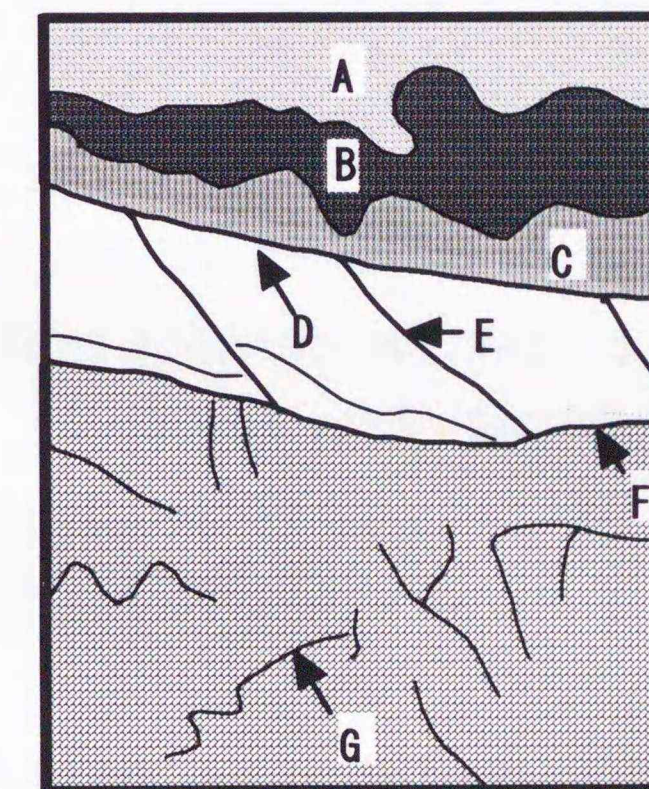
すべり面を含むすべり層は、地すべり土塊内に掘削された調査横坑（TS-38, 39坑）の側壁において、水平距離約8mにわたり直接観察できる（写真-2.3）。すべり層は、複数のせん断面が集合した層厚10～30cm程度の「せん断帯」として認められ、その主要部分は基盤の黒色泥岩中に形成されている。ここにはせん断の過程で生じたりーデルせん断面、スラストせん断面およびそれらの複合亀裂が発達している。すべり層内には、比較的新鮮な角礫～亜角礫状の泥岩および亀裂を充填する青灰色粘土が分布している。主変位せん断面に相当するすべり面は、すべり層最上部の崩積土との境界面に形成されていて、ここには鏡肌の発達した粘土薄層が存在する。また、すべり面直上の崩積土は、写真に示されたように波状を呈して積層していることから、本地すべりの滑動様式は急速かつ破壊的であったと推定される。本地すべりの特徴として、すべり層最下部の基盤泥岩との境界に、すべり面とほぼ平行に分布する粘土層が認められた。ここには、部分的ではあるが鏡肌が発達し、この鏡肌の傾斜方向が主変位せん断面のそれとほぼ同じであることから、これを副変位せん断面とする。以上より、すべり層を構成する粘土は、主変位せん断面粘土（D層）、副変位せん断面粘土（F層）、すべり層内の亀裂を充填する粘土（E層）に区分される（図-2.21）。さらに崩積土は、標準土色表¹⁾を基準とした色調をもとに3つのサブゾーン、すなわちそれぞれ、褐色（A層）、黄橙色（B層）、明灰色（C層）によって特徴づけられる粘土層に区分される。また、基盤の黒色泥岩にも亀裂を充填する粘土（G層）がみられる。



72m 71m

0 20 40cm

写真-2.3 TS-38 坑内で観察されるすべり層



72m 71m

0 20 40cm

図-2.21 坑深71-72mのすべり層の産状を示す模式スケッチ
A:褐色礫混じり粘土、B:黄橙色粘土、C:明灰色礫混じり粘土、
D:鏡肌を伴う青暗灰色粘土（主変位せん断面）、E:すべり層内の
亀裂を充填する青灰色粘土、F:一部に鏡肌を伴う暗灰色粘土
（副変位せん断面）G:黒色泥岩の暗灰色風化部分

2.4.3 すべり層粘土の鉱物学的・化学的特性

地すべり地に掘削された調査横坑(TS-38坑、坑深71~72m)から採取された粘土とくにすべり層粘土について、粉末X線回折分析、非晶質成分の定量分析、EPMAによる定量化学分析、および交換性陽イオン分析を行った。

(1) 含水比

すべり層粘土および崩積土の含水比を図-2.22に示す。すべり面粘土(E層)が最も高い含水比を有している。全体的には、崩積土の含水比(10.6~19.6%)が高い傾向を示している。

(2) 土粒子の密度

土粒子の密度は、主変位せん断面粘土(D粘土)が2.82g/cmと最も高い値をとり、次いで副変位せん断面粘土(F粘土)が高い。崩積土は2.72~2.82g/cmであり、すべり層粘土と崩積土との間に大きな差が認められる。

(3) 塑性指数

図に示されたとおり、塑性指数(I_p)と液性限界(W_L)は、ともに主変位せん断面粘土(D粘土)が高い。一般的に細粒ほど液性限界は高く、塑性限界は低くなる傾向にあるため、細粒土ほど塑性指数(I_p)が高くなる。なお、試料ごとに塑性限界は差異がないことから、液性限界(W_L)と塑性指数(I_p)は同じ傾向を示している。なお、A、B粘土は塑性限界試験から非塑性土に分類された。

(4) 鉱物組成

全試料の全岩試料と水簸試料のX線回折分析から石英、斜長石、緑泥石、イライト、スメクタイトが検出されたほか、崩積土から水酸化鉄(レピドクロサイト)が検出された。

図-2.23に、A~G粘土の主要構成鉱物である石英、斜長石、緑泥石、イライトおよびスメクタイトの鉱物量の相対的变化(石英指数)と非晶質成分の化学的溶解法(Segalen法)による定量分析結果を示す。石英の指数値は、基盤泥岩中のG粘土とすべり層粘土のE、F粘土で指数値が高く、すべり面粘土と崩積土で小さい傾向を示している。斜長石の指数値は、崩積土に比べすべり

層粘土および基盤泥岩中のG粘土で減少している。緑泥石については斜長石と類似の傾向が認められる。イライトはすべり面粘土が最も指数値が高く、スメクタイトは、すべり面粘土と崩積土で指数値が高く、基盤泥岩中のG粘土とすべり層粘土のE、F粘土で低くなっている。すべり面粘土は、石英とスメクタイトでは上位の崩積土と類似の傾向を示し、斜長石と緑泥石では、下位のすべり層粘土ならびに基盤泥岩中のG粘土と類似の傾向を示している。

非晶質成分は、すべり面粘土が約14wt.%と最も多く含有している。

(5) 陽イオン交換容量(CEC)および交換性陽イオン組成

水簸試料のCECおよび交換性陽イオン分析結果を図-2.24に示す。

すべり層粘土のCECの値は、15.5~24.9meq/100gの範囲にあり、とくにすべり面粘土(24.9meq/100g)が全試料中で最も高い値を示し、次いで副変位せん断面粘土(24.3meq/100g)が高い。

交換性陽イオンの構成比は、すべり層粘土および崩積土と基盤泥岩中の粘土のいずれの試料についても、Ca²⁺が最も高く(46.1~64.7%)、Mg²⁺がそれに次いでいる。K⁺とNa⁺の構成比は低く、いずれの試料もおおむね10%以下である。

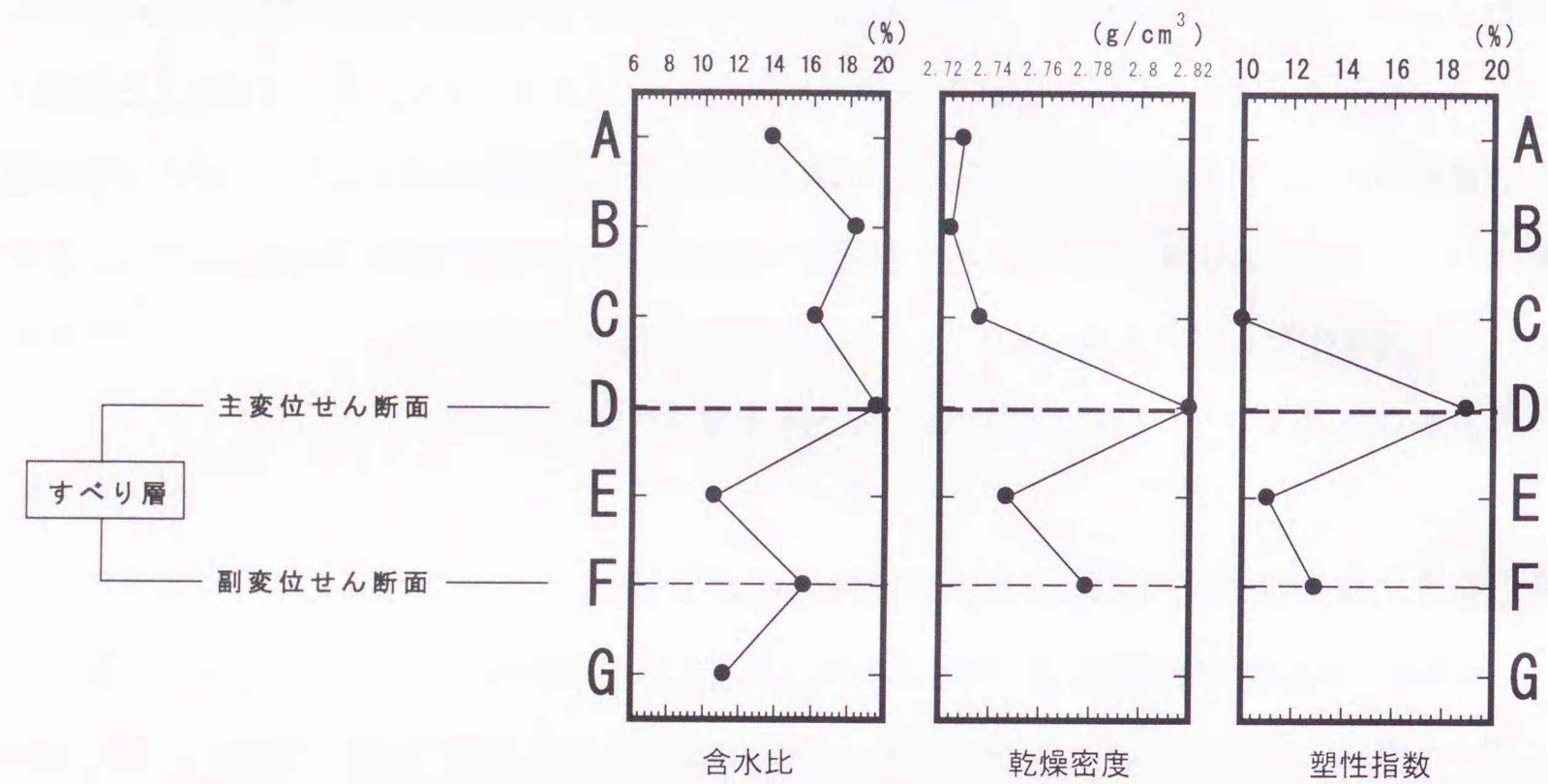


図-2.22 TS-38 坑坑深 71-72m 試料の含水比、乾燥密度および塑性指数

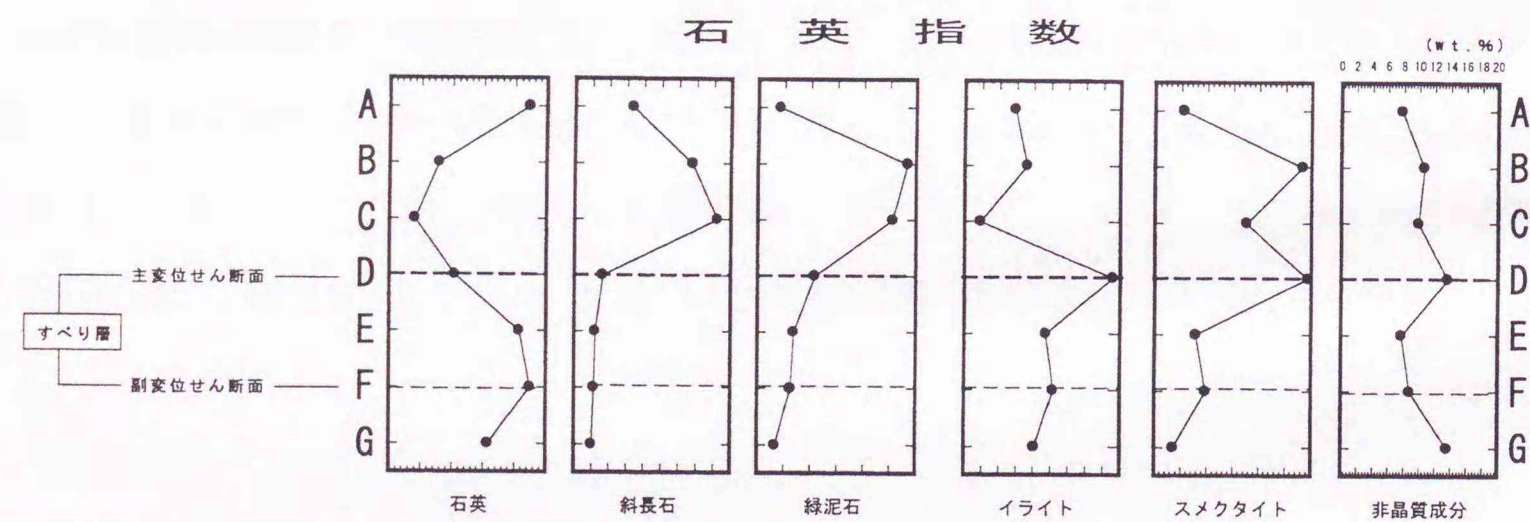


図-2.23 試料構成鉱物の量的変化

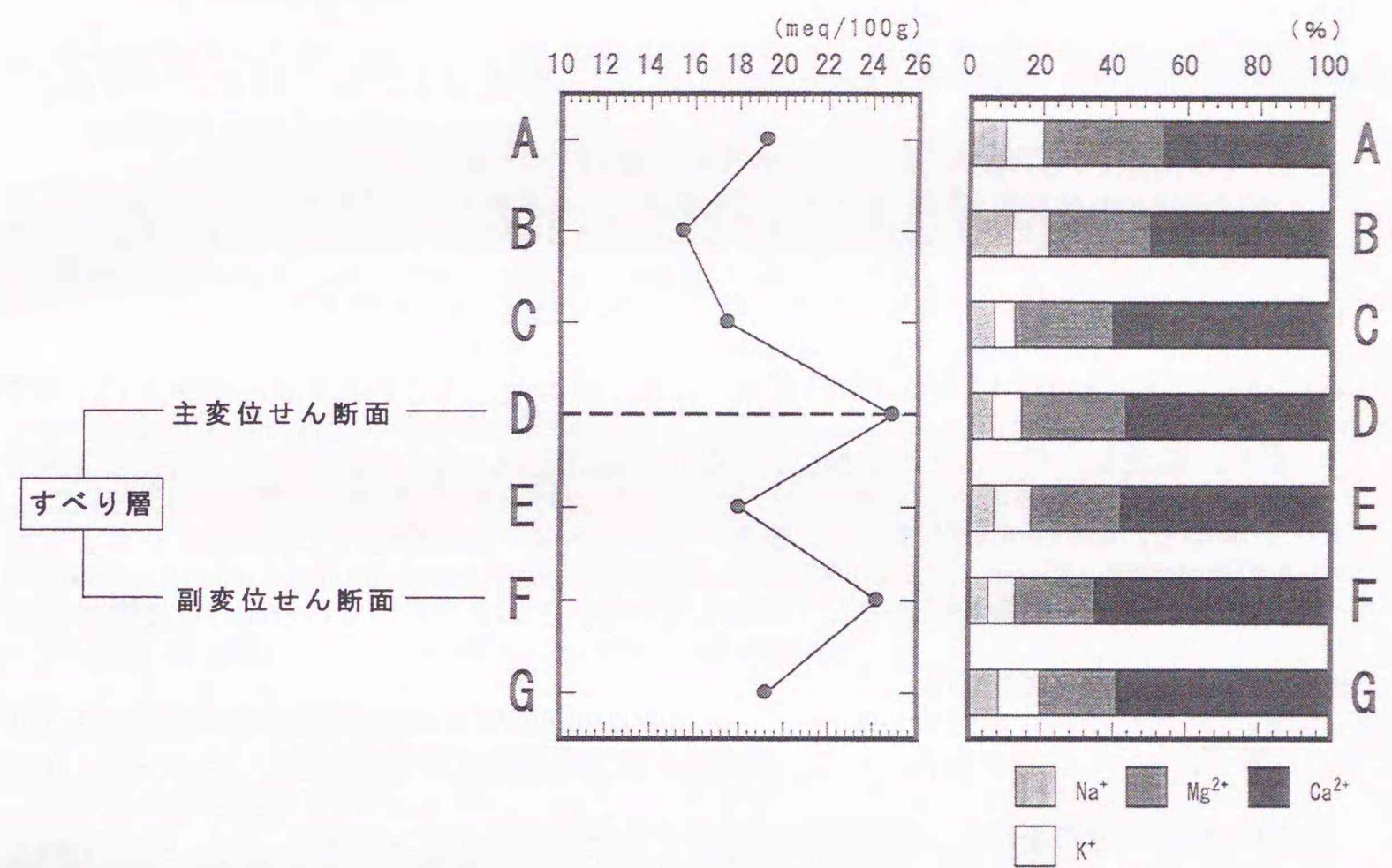


図-2.24 陽イオン交換容量 (CEC) および交換性陽イオン組成

2. 5 本章のまとめ

秋田県, 山形県, 岩手県に分布する地すべり地での, すべり面観察とすべり面(層)粘土の各種分析結果に基づき, その形態的特徴, 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。得られた結果は以下のようである。

- (1) 地すべり面の性状は, 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, この「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。
- (2) 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。
- (3) これらすべり面(層)粘土は各種分析の結果, 石英, 斜長石, スメクタイト, イライト, カオリン鉱物, 緑泥石, パーミキュウライトなどから構成され, 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た。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している。このように, すべり面には膨潤性粘土鉱物が普遍的に含まれている。
- (4) すべり面(層)粘土の化学的特性として, 膨潤性と密接な関係にあるCEC値は, 25.8~63.8(meq/100g)と幅広い分布を示し, 膨潤挙動に関係する交換性陽イオン組成は, Na^+ , K^+ の卓越する1価型と, Mg^{2+} , Ca^{2+} の卓越する2価型とに分かれた。この結果については, 地質年代との関係が認められないことから, 地すべりごとの滑動特性や地質構成など, さらなる詳細な検討が必要である。

<参考文献>

- 1) 小出博:日本の地這り, 東洋経済新聞社, pp. 1~259, 1995.
- 2) 高野秀夫:新潟地方の地すべり, 柴田秀賢教授退官記念論文集, pp. 361~366.
- 3) 岩渕清任・山崎孝成・小林充:福島県「抜戸」地すべり地のすべり面について, 地すべり学会第27回研究発表講演集, pp. 254~256, 1988.
- 4) 紀平潔秀:すべり面の構造についての事例研究, 地すべり, 第26巻, 第2号, pp. 9~16, 1989.
- 5) 千木良雅弘:風化と崩壊, 近未来社, 1995.
- 6) 玉田文吾:テストピットによる地すべり面探査, 地すべり, 第19巻, 第2号, pp. 6~11, 1982.
- 7) 申潤植:地すべり工学 一理論と実践一, 山海堂, 1989.
- 8) 大河原正文・米田哲朗・三田地利之・多田元彦:古期地すべり面判定のためのすべり層粘土の鉱物学的・化学的評価—岩手県明倉沢古期地すべり地を例として—, 応用地質, 第37号, 6号, pp. 2~13, 1997.
- 9) Jan Srodon and Dennis D. Eberl: ILLITE, REVIEWS in MINERALOGY, S. W. BAILEY, Editor, MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA, Vol. 13, MICAS, pp. 495~544, 1984.
- 10) 多田元彦・大河原正文:岩手県南西部の夏油地すべり地の粘土鉱物について, 地すべり, 第31巻, 第2号, pp. 24~31, 1994.
- 11) 小山正忠・竹原秀雄:新版標準土色帖, 日本色研事業, 1976.
- 12) 紀平潔秀:すべり面粘土の含水比差, 地すべり学会シンポジウム論文集, pp. 68~73, 1989.
- 13) 米田哲朗・大河原正文・多田元彦:岩手県明倉沢地すべり地の風化岩中にみられる緑泥岩のパーミキュライト化について, 粘土科学, 第35巻, 第1号, pp. 24~33, 1995.
- 14) 日本粘土学会:粘土ハンドブック第二版, 技法堂出版, 1987.
- 15) HASHIMOTO, I. and JACSON M. L.: Rappid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration, Clays Clay Minerals, Vol. 7, pp. 102~113, 1960.
- 16) SEGALIN, P.: Note sur une methode de d-termination des produits min-raux amorphous dans certains sol- hydroydes, Cah. ORSTOM ser Pedol, Vol. 6, pp. 101~126, 1968.
- 17) 北川靖夫:土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の定量に関する研究, 農技研報B, 第29巻, pp. 1~48, 1977.
- 18) KODAMA, H. and JAAKKIMAINEN, M.: A comparative study of selectives produced by grinding of

silicates, Proc. Intern. Clay Conf., Bologna Italy, pp. 399~410, 1982.

19) LINGSTON, R. B and JENNE, E. A. : NaOH dissolution of some oxide impurities from kaolins, Clays Clay Minerals, Vol. 12, pp. 633~646, 1963.

20) 児玉秀臣・林久人: 化学溶解法の比較検討—非晶質鉱物の同定と定量への応用—, 粘土科学, 第25巻, 第4号, pp. 139~147, 1985.

21) 佐々恭二: リングせん断による高速地すべりのメカニズム —福島県西郷村稗返地区の高速長距離運動地すべりについて—, 地すべり学会シンポジウム論文集, pp. 38~49, 1999.

22) TOYOSHIMA, M. : The sequence of river terrace development in the last 20,000 years in the Ou backborn range, Northeastern Japan, The Science Reports of Tohoku University, 7th Series (Geography), Vol. 34, No. 2, pp. 88~105, 1984.

第3章 粘土の残留強度発現機構

3. 1 概 説

残留強度は、大きなせん断変形を受けて残留状態に至った時点のせん断強さで、せん断面を構成している粒子はせん断方向に沿って配向していることが確認されている^{1)~6)}。その概念を図-1.1に示す。このようにせん断面の構造に着目すると残留強度とは、平板状あるいは鱗片状の鉱物粒子を含む粘土においては、せん断方向への粒子の配向が完全に終了したときの値⁷⁾を示している。よって残留状態におけるせん断は、粘土粒子表面間あるいは粒子表面—水との摩擦現象と考えられ、粘土粒子の物理的・化学的作用が強度発現の主な原因と考える。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の多くの研究がなされているものの、“残留強度とは何か”という問題について取り組んだ例は少ない。

そこで本章では、トライボロジーと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た。トライボロジーとは、“相対運動を行いながら相互作用を及ぼしあう表面及びそれに関連する実際問題の科学技術”と定義されるもので、摩擦、潤滑及び磨耗の分野を一括している学問である。その適用範囲はスケールの的にはマクロからミクロ(原子・分子)まで、材料では金属などの無機物が中心であったが最近では人間の関節のような有機物にまでその適用が広がっている。研究手段は物理的、化学的、そして生物学的と多岐にわたっており、それらが互いに有機的に結びついて成果を出している。また、粒子の表面電荷や吸着などの界面現象については、懸濁液中に微粒子が分散した状態(サスペンション)を対象とするコロイド科学において整理されている。したがって、トライボロジーとコロイド科学で取り扱っている界面物性に関する理論は、粘土の残留強度の発現機構を理解する上で有効と考えた。

3. 2 摩擦の分類

摩擦とは、接触している二物体が相対的に運動し、また運動し始める時、その接触面で運動を妨げようとする向きに力のはたらく現象またはその力⁸⁾をいう。トライボロジーでは、摩擦を接触面の状態によって「乾燥摩擦」と「潤滑摩擦」とに大別している。乾燥摩擦とは、完全に清浄な表面における摩擦であり、潤滑摩擦とは油やグリースなどの潤滑媒(流体膜)が摩擦力に関与しているときの摩擦である。粘土は、構造中に水を有することから潤滑摩擦に属する。また、摩擦の形態によって「すべり摩擦」と「転がり摩擦」があるが(図-3.1)、ここで扱っている残留状態は、せん断面を境にした粘土の相対運動であることから「すべり摩擦」に相当する。

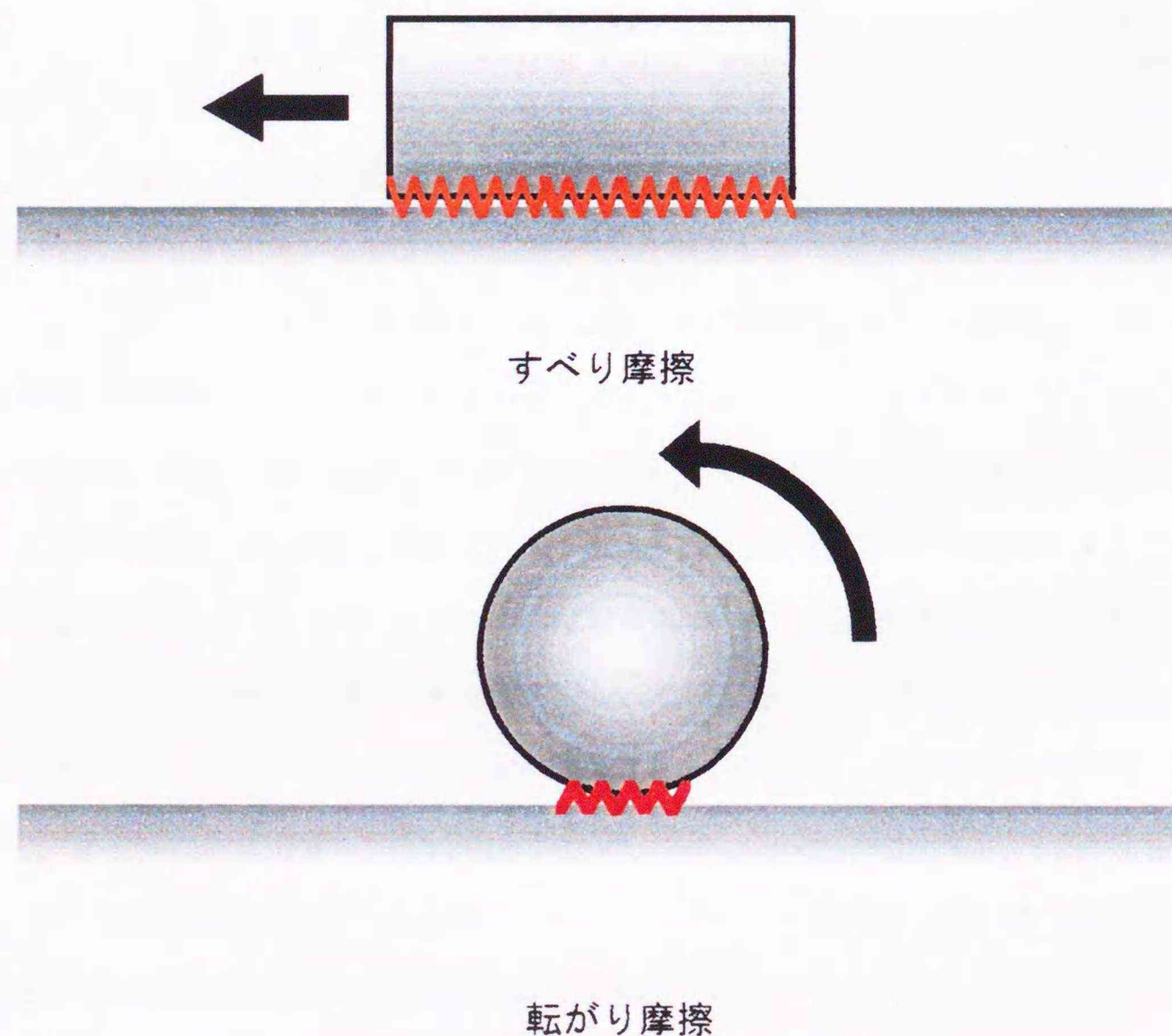


図-3.1 摩擦の分類模式図

3. 3 摩擦係数

アモントン(Amontons)とクーロン(Coulomb)は、それぞれ摩擦実験を行い、摩擦力 F が垂直荷重 W に比例することを示すとともに、以下に示す経験的な摩擦法則を提示した。

$$F = \mu \cdot W \quad \Delta \Delta \Delta (3.1)$$

アモントン・クーロンの摩擦法則

- ①摩擦は荷重に比例する。
- ②摩擦力は見かけの接触面積に依存しない。
- ③動摩擦力はすべり速度に依存しない。

アモントン・クーロンの摩擦法則では、垂直荷重 W に対する摩擦力 F の比を摩擦係数 μ ($=F/P$)としている。摩擦係数は、見かけの接触面積には関係しないものであり、摩擦を発現している固体の表面状態とその種類に関係する。

図-3.2に摩擦係数とせん断抵抗角の関係を示す。前述のように摩擦係数 μ は固体間に作用する力を荷重で除したものであり、これはせん断抵抗係数 $\tan \phi$ の求め方と同じである。残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ は、間隙比一定のもと(体積変化 $\Delta V \approx 0$)で、破壊時に破壊面上に作用する有効垂直応力 σ' のみに依存するせん断抵抗を表す材料定数であり、Hvorslevの破壊基準における $\tan \phi_e$ に相当する。このように、残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ は、排水条件によらない真の強度定数であり、応力履歴に依存しないと仮定されることから、本論では、せん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ と摩擦係数 μ は等価と考える。

$$\tau_r = c_r' + \sigma' \cdot \tan \phi_r' \quad \Delta \Delta \Delta (3.2)$$

τ_r : せん断応力(kPa)

σ' : 垂直応力(kPa)

c_r' : 見かけの粘着力(kPa)

ϕ_r' : せん断抵抗角($^\circ$)

アモントン・クーロンの摩擦法則

摩擦は荷重に比例する
摩擦力は見かけの接触面積に依存しない
(摩擦力は真実接触面積に依存する)
動摩擦力はすべり速度に依存しない

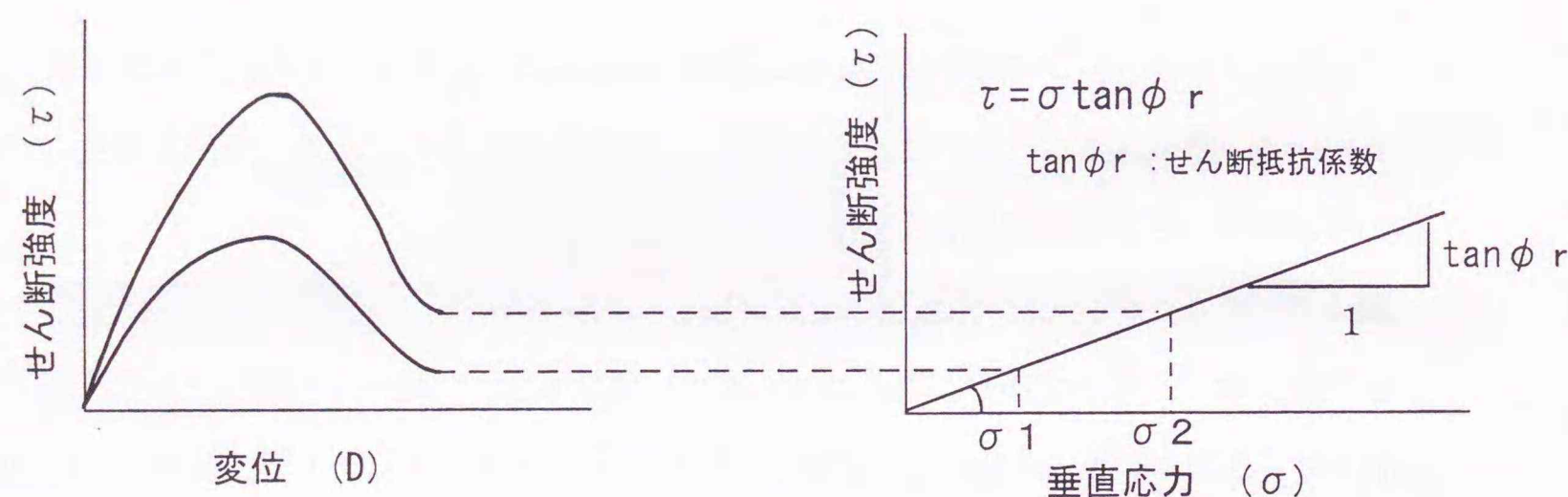
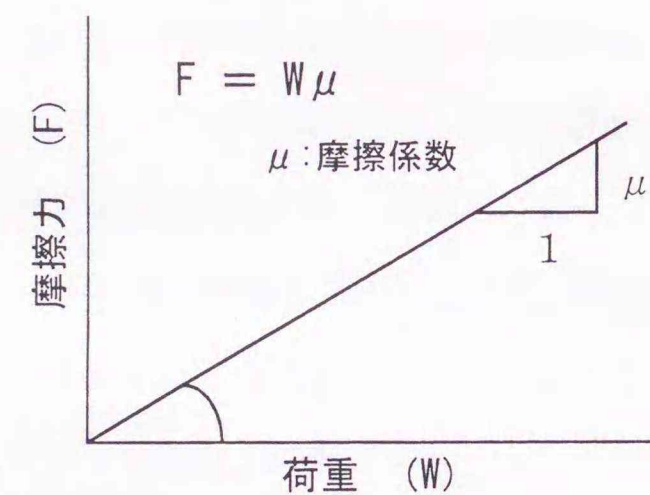


図-3.2 摩擦係数とせん断抵抗角

3. 4 ストライベック曲線と潤滑状態

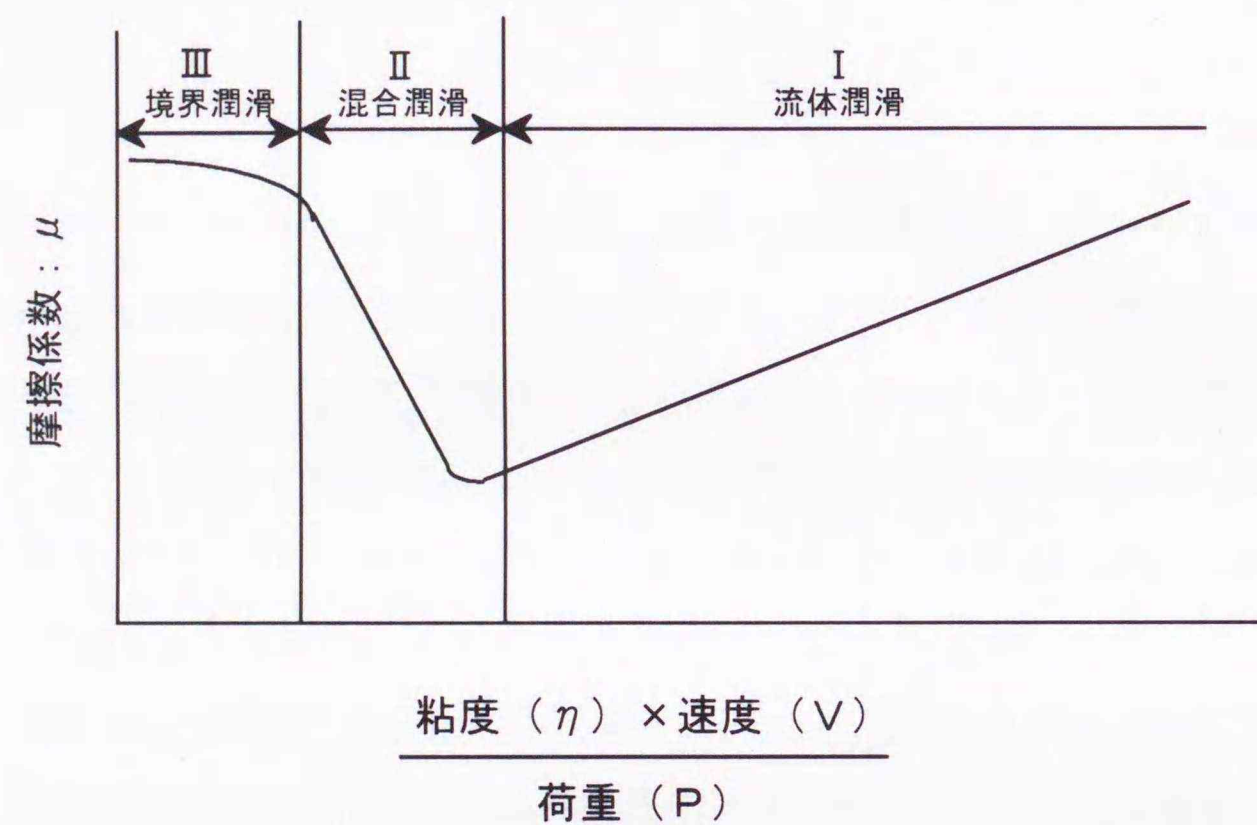
トライボロジーでは、潤滑摩擦における固体表面間の状態を、ストライベック曲線 (図-3.3)⁹⁾ と呼ばれる特性曲線により3領域に区分している。ストライベック曲線とは、縦軸に摩擦係数 μ を、横軸にゾンマーフェルト数 ((粘度 η) $\times$ (相対速度 V) / (荷重 P)) と呼ばれる無次元数をとったもので、摩擦係数 μ が流体膜の粘度 η 、荷重 P および相対速度 V の関数として表せることを示している。以下に3領域^{10), 11)} について説明する。

領域Ⅰは、二つの固体表面が流体膜(潤滑油など)で完全に分離されている状態で「流体潤滑」と呼ばれる。摩擦は、流体膜の粘性または粘弾性によって決まり、固体材料の性質にほとんど依存しない。摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に比例し直線的な変化を示す。すなわち、粘度 η と速度 V に比例し、荷重 P に反比例する。

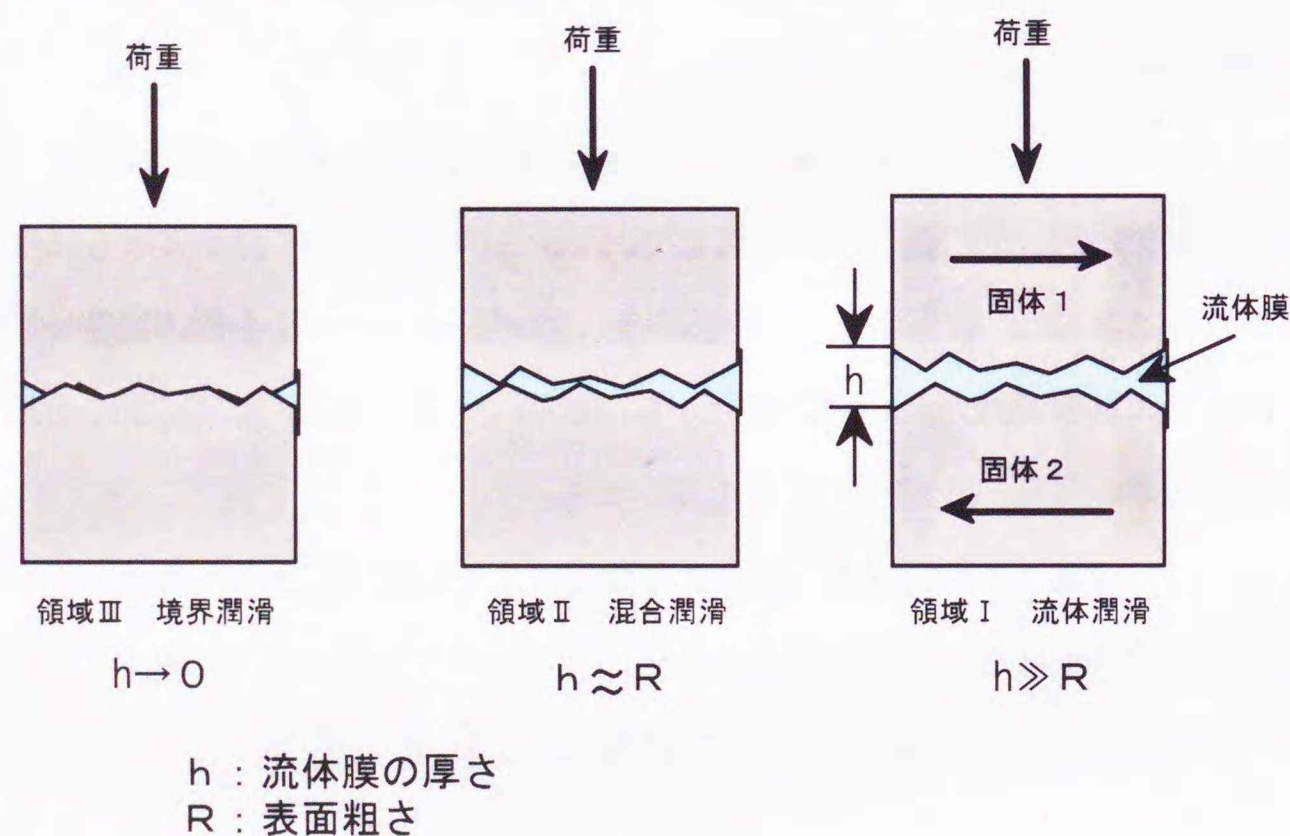
領域Ⅱは、「流体潤滑」と後述の「境界潤滑」が混在している状態で、「混合潤滑」と呼ばれる。すなわち、摩擦は流体潤滑膜と境界潤滑膜(半固体～半液体的挙動)の2つの働きにより生じ、摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に反比例する。

領域Ⅲは、流体膜の厚さが数分子層以下と非常に薄くなった状態で「境界摩擦」と呼ばれる。粒子表面の凸部では部分的に固体接触も起きており、この状態では、流体膜はもはや普通の流体のように流れることはない。したがって摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に依存せず、材料の特性により決まる。摩擦現象は流体膜の粘性からは説明できず、固体-流体膜間の相互作用とくに流体膜の界面化学的作用や化学反応性が重要となる。

また、このほか**領域Ⅰから領域Ⅱへ遷移する領域**は、とくに「弾性流体潤滑」と呼ばれ、点接触、線接触などの集中接触により接触面が高圧になる特異な潤滑現象で、転がり軸受け、歯車、カムなどの潤滑の場合に生じる。



ストライベック曲線



各潤滑状態に対する摩擦形態

図-3.3 ストライベック曲線と潤滑状態^{12), 13)}

3. 5 各潤滑状態における摩擦の起因

前節では、固体表面間の潤滑状態がストライベック曲線により「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境界潤滑」に区分されることを述べた。粘土の残留状態を想定した場合、せん断面での潤滑状態は水を流体膜とした流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑のいずれかの状態にあると考えられることから、それぞれの潤滑状態に相応した残留強度を発現するものと推定される。本節では、これら潤滑状態における摩擦の起因を述べる。なお、領域 I-II 遷移領域での「弾性流体潤滑」は、局部的に集中荷重が生じた特異な潤滑状態で、金属のような硬い材料において生じる現象である。

「流体潤滑」では、せん断面は流体膜で完全に分離され、ここでの摩擦は流体膜の粘性または粘弾性によって決まる。流体の粘性には、ニュートン粘性と非ニュートン粘性があり¹⁴⁾、ニュートン粘性とは、せん断応力 τ とせん断速度 V が次式の関係にある状態をさす。

$$\tau = \eta V \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

すなわち、せん断応力 τ はせん断速度 V に対して線形比例する。図-3.4 は、粘土の残留強度とせん断速度との関係を表した実験データ¹⁵⁾ であるが、残留強度とせん断速度は非線形である。このことは、せん断面間に分布する流体膜が非ニュートン粘性(アイリング粘性)であることを示して(第3章6節で詳述) いる。

「混合潤滑」では、「流体潤滑」と「境界潤滑」が混在した状態であることから、ここでの摩擦は、両者の主要因である流体膜の粘性と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により発現しているものと考ええる。

また混合潤滑では、互いの表面が接近しているため、混合潤滑に特有の摩擦現象として表面の凹凸のかみあいが生じていると考えられる。かみ合い機構^{16), 17)} には「凹凸説」と「凝着説」、そして「掘り起こし説」の3説がある(図-3.5)。凹凸説とは、一つの突起が相手の突起や斜面を滑り上がる時に要する力の摩擦方向成分を摩擦力とする考えで、接触部の摩擦はないものとする。凝着説とは、接触した突起間に作用する凝着力に逆らって突起を摩擦方向に動かして、接触部をせん断するのに要する力を摩擦力とする考え方である。掘り起こし説とは、硬い突起が柔らかい材料を引っかいて進むのに要する力を摩擦力とする考え方である。さらに、これら3説は独

立したものではなく一連のすべり摩擦プロセスの各段階での摩擦の起因とする考えがある (図-3.6)。これらを含めて、すべり接触でのすべり摩擦は真の接触面における微視的な摩擦力の総和として表すことができ、微視的観点からのすべり摩擦は次式で表される。

$$F_F = \sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4 \quad \Delta \Delta \Delta (3.4)$$

ここで F_F : 全体の巨視的摩擦力, $\sum F_1$: 材料の弾性変位による抵抗, $\sum F_2$: 材料の塑性変位による抵抗, $\sum F_3$: 硬い材料による軟らかい材料表面を掘り起こすために起こる抵抗, $\sum F_4$: 材料同士の接着部のせん断による抵抗である。式から接触面では, (1) 表面凸部の弾性変形, (2) 表面凸部の塑性変形, (3) 掘り起こし, (4) 凝着部のせん断, が生じており, 摩擦発生プロセスに (1) から (4) が連続して含まれていることを示している。これら一連のかみ合い機構については, 基本的に二面間凸部の接触方式を表しているものであり, 摩擦力の発現は結局のところ接触部での相互作用によると考える。

「境界潤滑」では, 流体膜の厚さが数分子層以下と非常に薄くなり, 一部では凸部同士の固体接触も起きている。ここでの摩擦は, 粘土鉱物と水との界面電気化学的作用が摩擦の主な起因と考える。すなわち, ① 静電力 (同形置換による永久電荷と端面の変異荷電などに起因する電気二重層), ② 粒子全体に作用する分子間力 (van der Waals 力など), ③ 水合力, に起因した相互作用である。

以上より, 各潤滑状態における摩擦は, 以下の作用に起因すると考えられる。

- ① 流体潤滑 : 流体膜の粘着作用 (粘性)
- ② 境界潤滑 : 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
一部, 表面凸部同士の固体接触による凝着作用
- ③ 混合潤滑 : ①, ②の混在

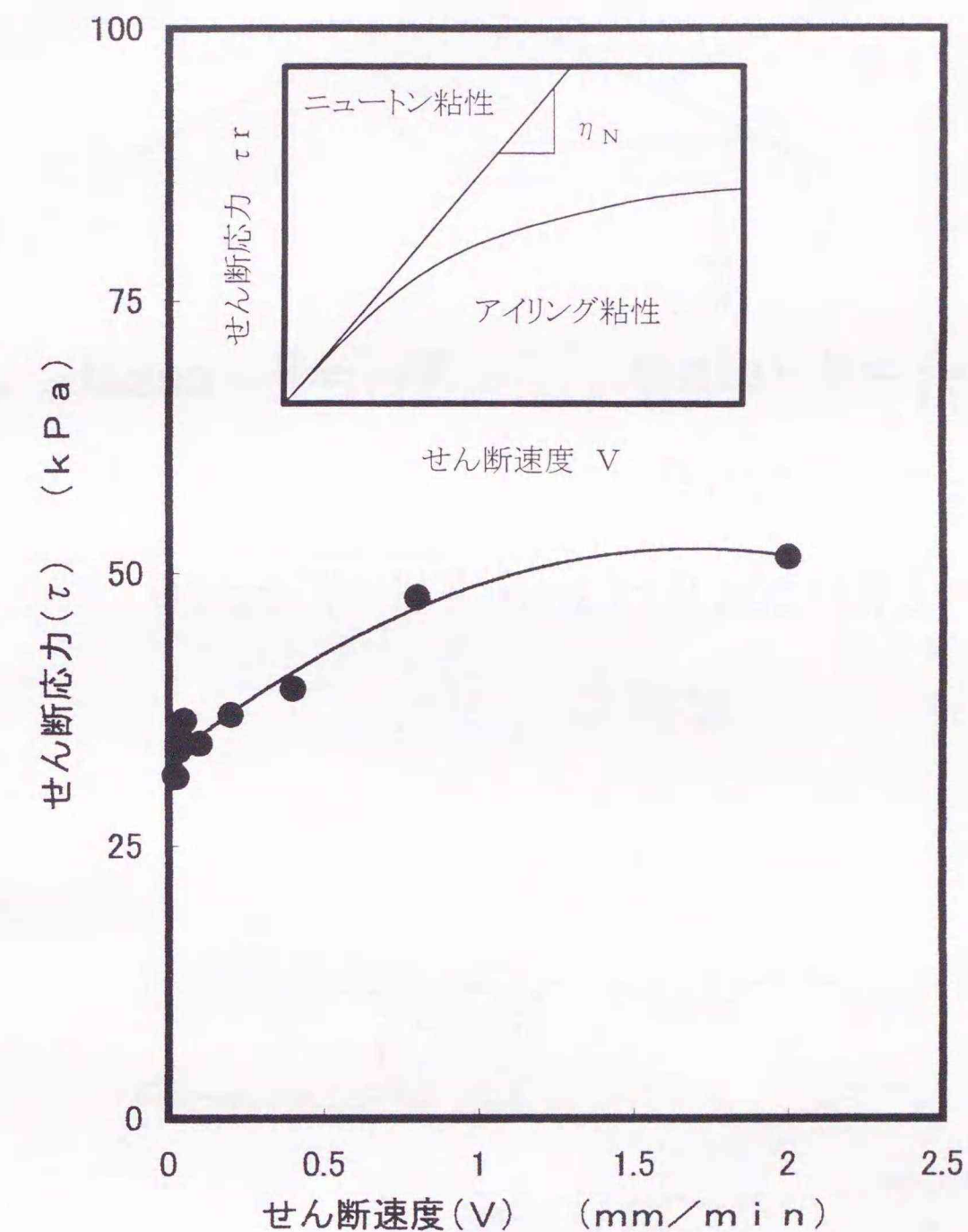
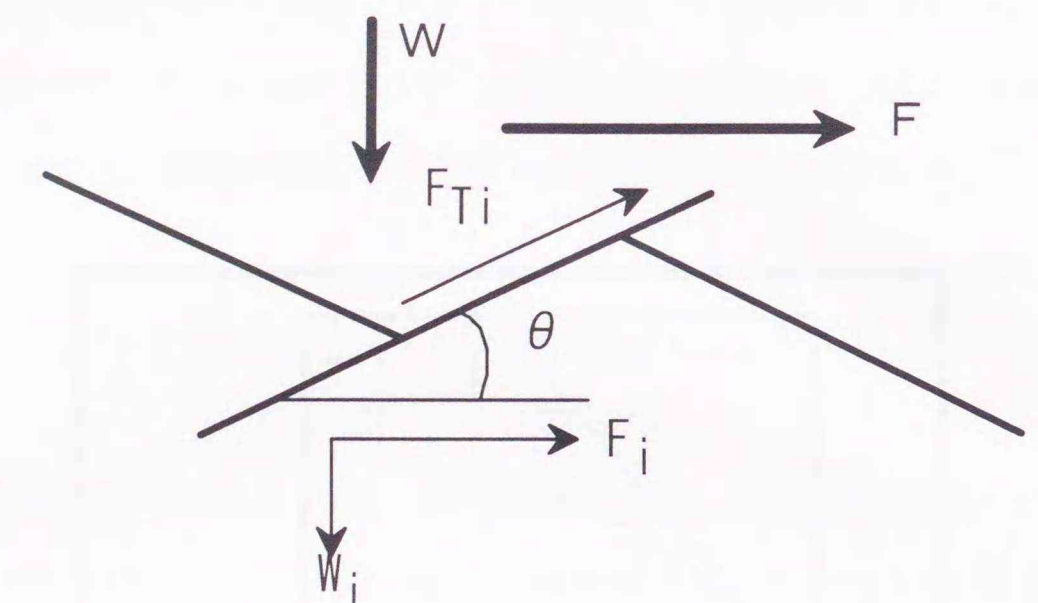


図-3.4 排水条件が近似的に成立している状態におけるせん断応力 (τ) - せん断速度 (V) の関係¹⁵⁾

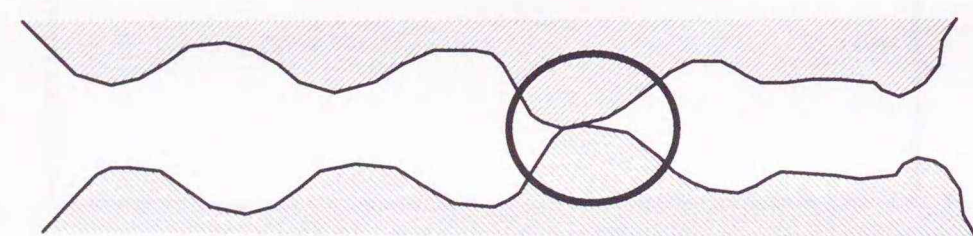


$$F_{Ti} = W_i \cdot \sin \theta \quad F_{Ti} = F_i \cdot \cos \theta$$

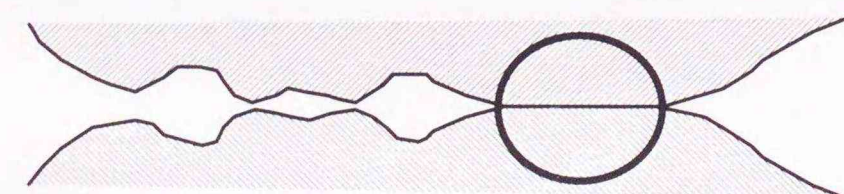
$$F_i = W_i \cdot \tan \theta$$

$$F = \sum W_i \cdot \tan \theta = \tan \theta \sum W_i = W \cdot \tan \theta$$

摩擦の凸凹説

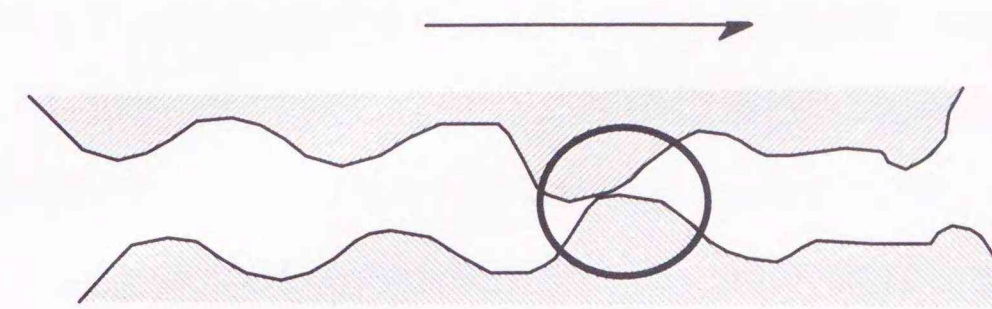


掘り起こし

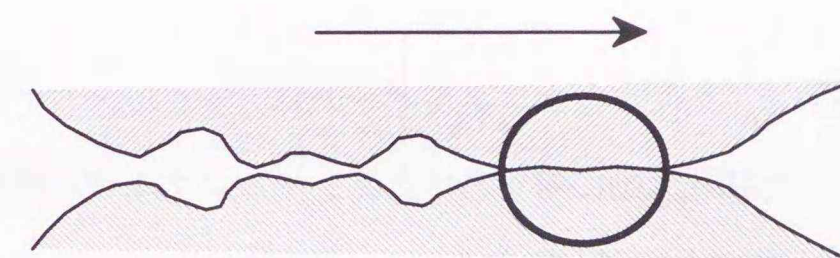


凝着結合

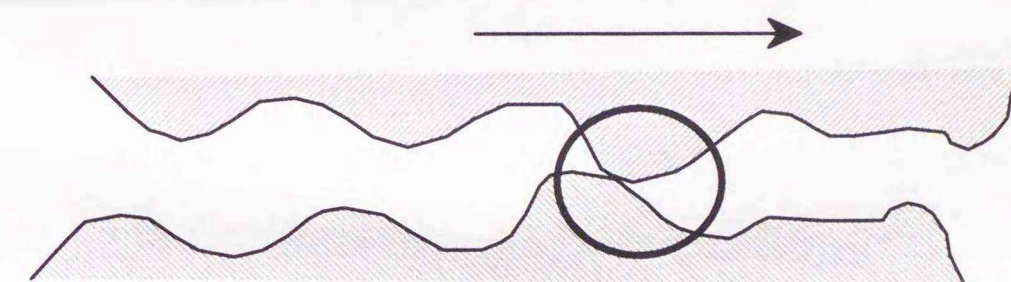
図-3.5 突起のかみ合い機構



第Ⅰ段階：
弾性変形
塑性変形
掘り起こし



第Ⅱ段階：
凝着結合



第Ⅲ段階：
結合部のせん断
弾性回復

図-3.6 摩擦プロセスの各段階

3. 6 粘性理論

3.6.1 アイリングの粘性理論 (流体摩擦)

粘土粒子の表面には、粘土鉱物の負電荷とバランスをとるために吸着水がその極性により付着している。そのため、粘土粒子はこれら吸着水膜の厚さに応じて液体的挙動を示すと考えられる。このような状態は、摩擦が流体膜の粘性に起因している「流体潤滑」に相当し、“絶対反応速度論”から導かれるアイリングの粘性理論¹⁸⁾が適用される。

粘性理論とは、アイリングにより導入された理論で、原子と原子(または分子と分子)が空孔(hole)を介してある体積(自由体積と称す)内では自由に位置交換をしている分子を前提とし、絶対反応速度理論の誘導から導き出されたもので、自由エネルギーの熱力学表現として示されている。図-3.7aに、アイリングの提唱した粘性流動に対するポテンシャルエネルギー障壁を示す。図に示されたとおり、ずり応力(せん断応力)がない場合は、Aの位置にある粒子とCの位置にある粒子の活性化エネルギー E_0 はともに同じで流動は起こらない。一方、ずり応力(せん断応力)が作用すると、Aのエネルギー障壁の高さは $1/2 \cdot f \cdot \lambda$ だけ減少し、反対方向のCのエネルギー障壁の高さは $1/2 \cdot f \cdot \lambda$ だけ増加する。そのため、AとCとのエネルギー障壁の高さに差が生じるため粒子は流動する。粒子が1秒間にどちらかに移動する回数または個数(比速度： c (個/秒))は次式のように表されている。

$$c = \frac{kT}{h} \cdot \frac{Z_*}{Z} \exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right) \quad \Lambda \quad \Lambda \quad (3.5)$$

ここで k はボルツマン定数(Boltzmann's constant ; 1.3808×10^{-16} erg/degree)で、巨視的な量である温度と微視的な量である分子運動を結びつける定数である。また k は気体定数 R (8.3144×10^7 erg/deg/mol)をアヴォガドロ数(Avogadro's number) N_A (6.0225×10^{23} /mol)で除した値である。 h はプランク定数(Planck's constant ; 6.626×10^{-27} erg·s)で、 T は絶対温度である。上式において kT/h 項は置かれた系の温度に応じた各微粒子の熱振動または有効速度を表わす。 Z_* および Z は、それぞれ活性化状態およびはじめの状態の流動単位の分配関数である。

柴田¹⁹⁾は、粘性に寄与する単位として流動単位を導入し、粘土の場合、せん断によって位置交換するのはこの流動単位であるとした。

図-3.7bは流動を起こす力がはたらくときのエネルギー障壁を表したもので、流動単位はエネルギー障壁を乗り越えるごとに、距離 λ だけ移動する。ここで c_f および c_b はそれぞれ1個の流動単位が前方向および後方方向へ毎秒障壁を通過する回数であるから、その流動単位が毎秒移動する距離、すなわちその層の運動速度は一つの方向には $c_f \lambda$ 、他の方向には $c_b \lambda$ で与えられる。ゆえにせん断応力 f が作用した結果として、前方へ移動するときの相対せん断速度は $(c_f - c_b) \lambda$ に等しく、また $f \lambda$ は流動単位1個にはたらくせん断力となるため f とすると、せん断速度は次式のように示される¹⁸⁾。

$$\begin{aligned} V &= (c_f - c_b) \lambda = \left[c \exp\left(\frac{\frac{1}{2} f_* \lambda}{kT}\right) - c \exp\left(\frac{-\frac{1}{2} f_* \lambda}{kT}\right) \right] \lambda \\ &= 2c \lambda \cdot \sinh\left(\frac{\frac{1}{2} f_* \lambda}{kT}\right) \\ &= 2 \lambda \frac{kT}{h} \frac{Z_*}{Z} \exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right) \cdot \sinh\left(\frac{\frac{1}{2} f_* \lambda}{kT}\right) \quad \Lambda \quad \Lambda \quad (3.6) \end{aligned}$$

(3.6)式は定常流動時の粘土のせん断速度とせん断応力を関係づける基本式であるが、実質的な変形を表現するために巨視的パラメータとの接続がなされている。粘土の流動に対しては、一般にせん断力の作用によって供給されるエネルギーが熱エネルギーよりも大きいと考えられるため、 $\sinh(f \lambda / 2kT) \approx (1/2) \exp(f \lambda / 2kT)$ と近似され、粘性理論における相対せん断速度は(3.7)式のように示されている¹⁹⁾。

$$V = \lambda \frac{kT}{h} \frac{Z_*}{Z} \exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{1}{2} \frac{\tau \lambda}{kTS}\right) \quad \Lambda \Lambda \Lambda (3.7)$$

ここに、 τ は粘土に作用するせん断応力(N/cm²)、 f は流動単位に作用するせん断力(N/個)、 S は微視的すべり面単位面積当たりの流動単位数(結合数)(個/cm²)である。

ここで(3.7)の両辺の対数を取り、常用対数に変換すると次式となる。

$$\log V = \left(\frac{\lambda}{4.606kST}\right)\tau - \left[\frac{E_0}{2.303kT} - \log\left(\lambda \frac{Z_*}{Z} \cdot \frac{kT}{h}\right)\right] \quad \Lambda \Lambda \Lambda (3.8)$$

ここで

$$a = \left(\frac{\lambda}{4.606kST}\right) \quad \Lambda \Lambda \Lambda (3.9)$$

$$b = \left[\frac{E_0}{2.303kT} - \log\left(\lambda \frac{Z_*}{Z} \cdot \frac{kT}{h}\right)\right] \quad \Lambda \Lambda \Lambda (3.10)$$

とすると、(3.8)は次式で表される。

$$\log V = a\tau - b \quad \Lambda \Lambda \Lambda (3.11)$$

この式は、せん断速度(V)に対してせん断応力(τ)すなわち残留強度が対数比例することを表している。

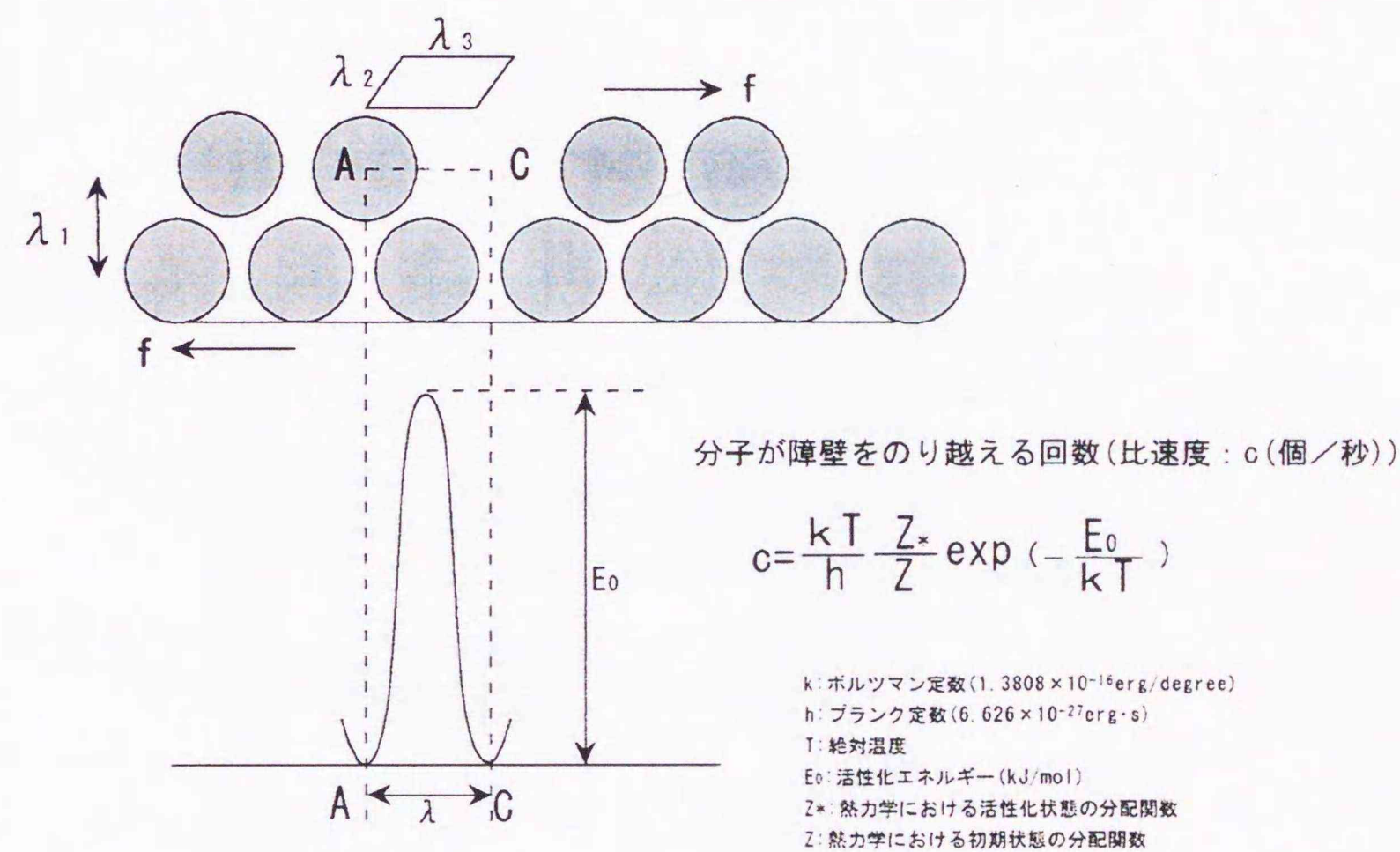
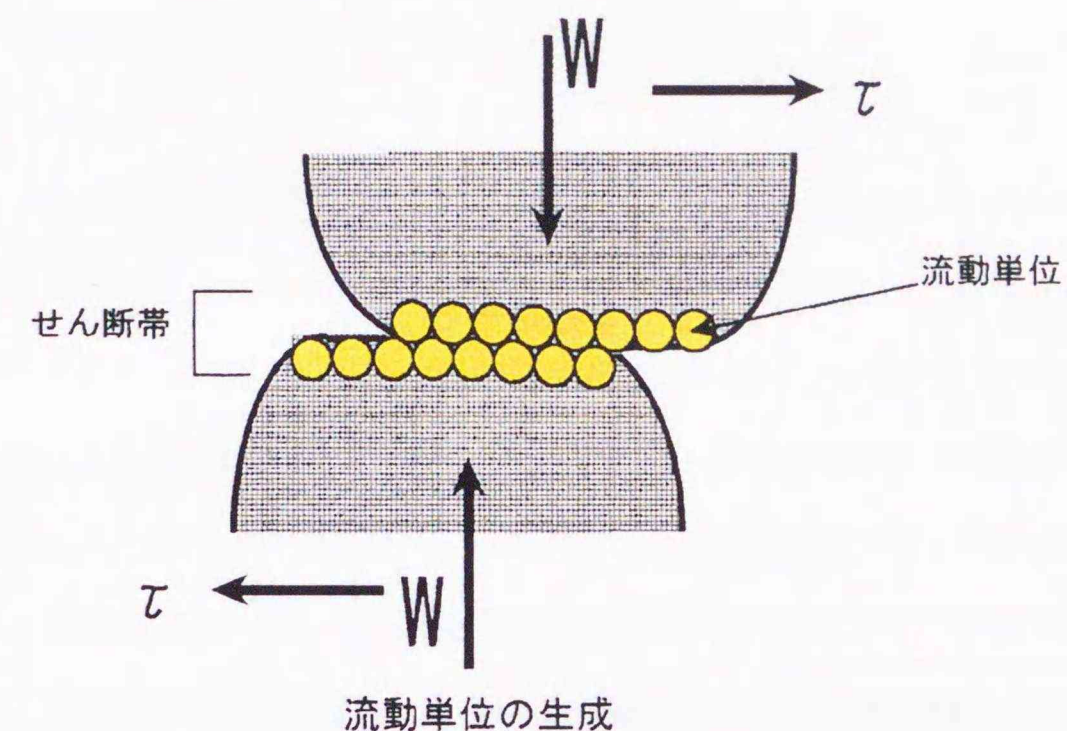


図-3.7a 分子級微粒子間距離と空孔の関係¹⁸⁾

λ は粘性流動に対する二つの平衡位置の間の距離

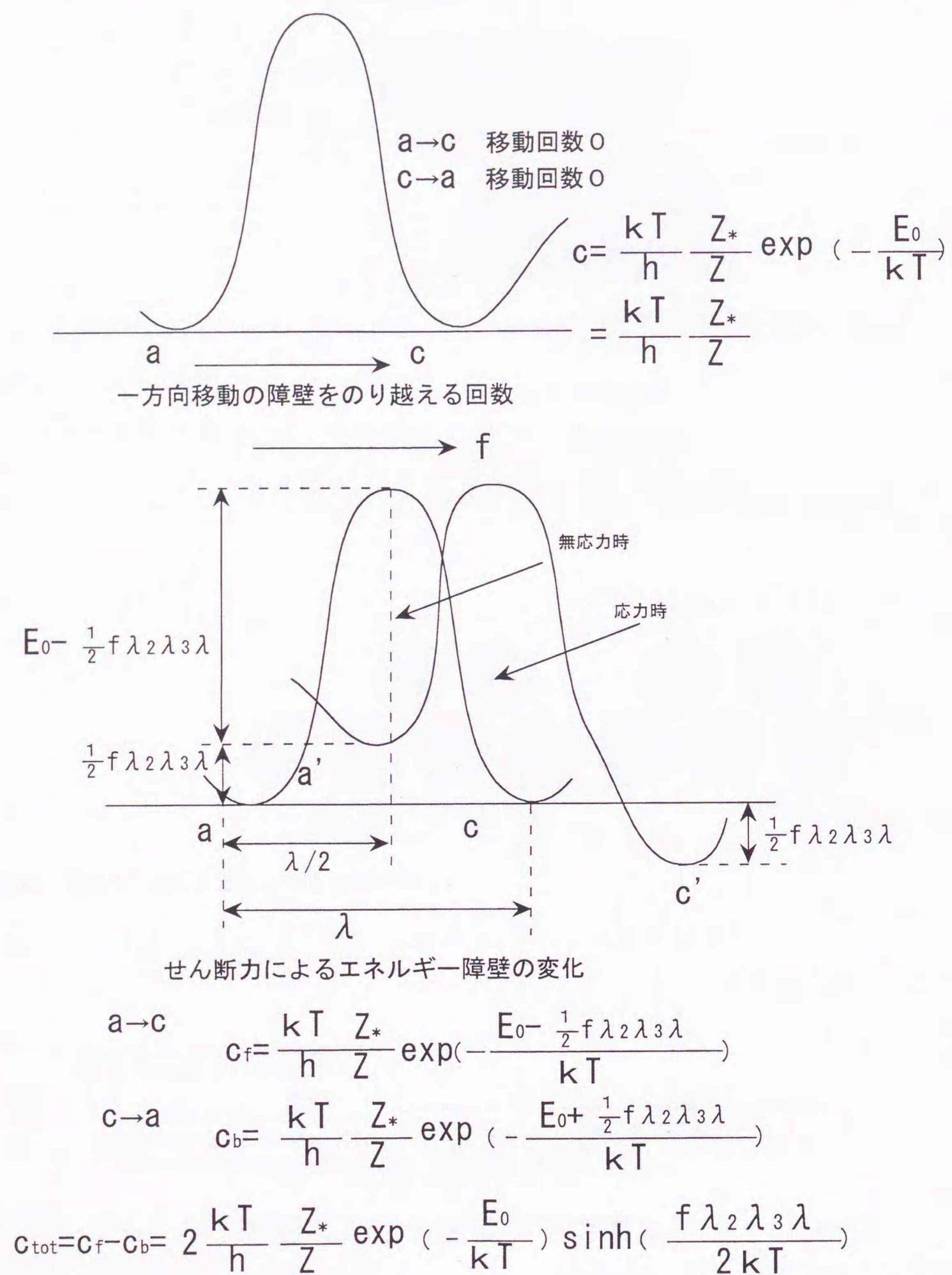


図-3.7b せん断応力があるときの粘性流動に対するポテンシャル・エネルギー障壁

3.6.2 流体膜の粘性

粘土粒子表面への流体膜（吸着水）の吸着は、強い化学結合により分子層が拘束されることにより行われる。これにより粒子表面から 10～15 Å 範囲の強吸着水層では、粘性は自由水の約 100 倍に達し、そのさらに外側を取り囲む弱吸着水層においても自由水よりかなり高い粘性を示すことが知られている（図-3.8）。このような吸着分子層の半固体～半液体的な挙動は、強い化学吸着によるもので、化合物の生成を引き起こす力と同程度の力をもつ強い吸着現象である。これら吸着水層の分布域において、界面の状態が前述の流体潤滑にあるとすれば、荷重のすべてを流体膜が負担するため、流体膜の圧力はさらに大きなものとなる。そのため吸着水層はあるせん断強さ S_1 を持つと考えられる。吸着水層の厚さとせん断強さに関して今後、定量的な評価が必要である。

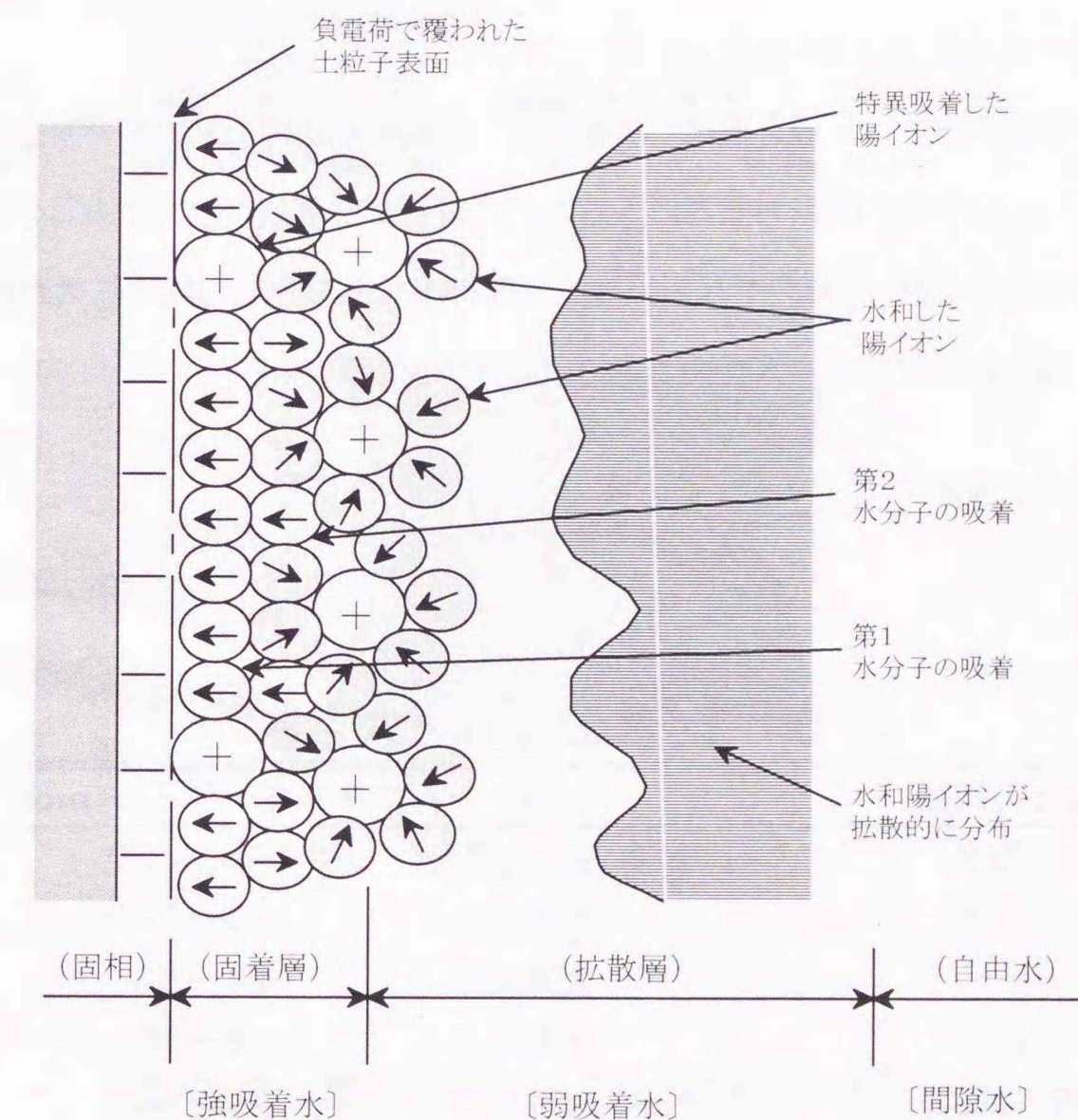


図-3.8 吸着水の概念図 ²⁰⁾

3. 7 凝着理論

3.7.1 凝着理論概説

摩擦を発現する固体表面間が「境界潤滑」と「混合潤滑」状態にあるとき、局所的に粒子表面の凸部同士が固体接触が生じている。一般に接触には、2つの結合様式があり、まず面と面とが接近することにより互いの引力圏内に入る部分ができるために結合する二次結合（van del Waals力など分子間力、水素結合）、さらに力加わることにより両者が一体となる一次結合（イオン結合、共有結合、金属結合）である。凝着とは、分子間力によって互いに付着することであるため二次結合に相当する。表-3.1に各化学結合の結合エネルギーを示す。表に示されたとおり、強い摩擦力が期待できるのは一次結合であるが、残留状態でのせん断を考えると接触面が常に変わる接触面での一次結合は容易ではない。

以上より、「境界潤滑」と「混合潤滑」状態では、せん断の過程で互いの表面凸部が接近することによりお互いの分子間力の引力圏内に入るために凝着が生じ、ここでは瞬間的な固体間の弱い接着がなされている（図-3.9）。これら固体表面間の接触部分をせん断する力が摩擦力すなわち残留強度の一端を担っていると考えられる。

表-3.1 結合の種類と大きさ²¹⁾

結合の種類	結 合	エネルギー(kcal/mol)
一次結合 (化学結合)	イオン結合	140~250
	共有結合	15~170
	金属結合	27~83
二次結合 (分子間力) (ファン・デル・ワールス力)	水素結合	3~10
	分散力	~ 5
	誘起力	~0.5

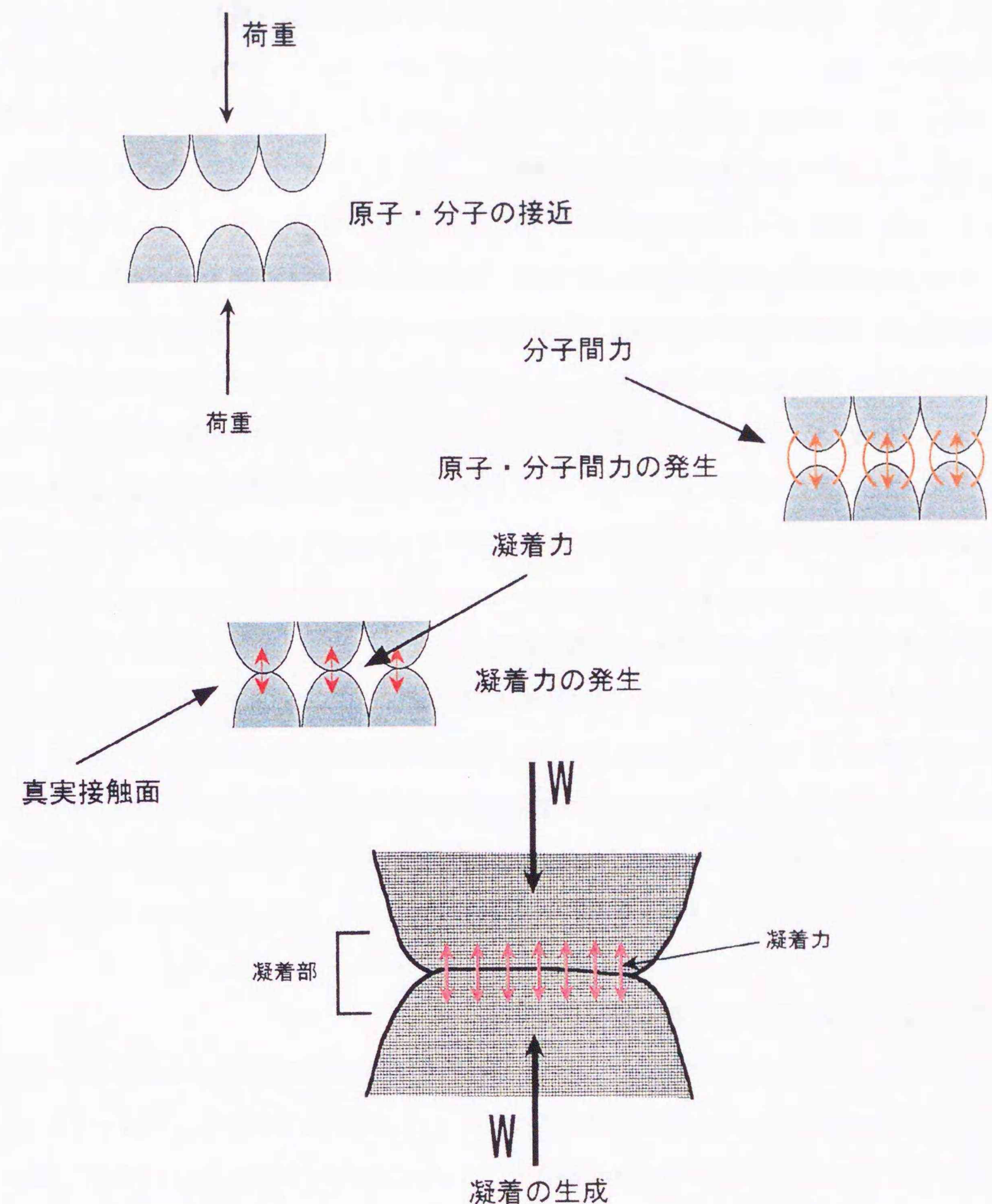


図-3.9 凝着理論による凝着の生成

3. 8 界面における相互作用 (境界摩擦)

3.8.1 スケールごとの相互作用力

界面とは、二つの物質の境の面のことであり、残留強度の発現の場であるせん断面もまさしく界面である。ところで、摩擦を発現している固体表面が「境界潤滑」あるいは「混合潤滑」状態にあるときは、流体膜の厚さは数分子層以下と非常に薄いため、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が摩擦の主な起因と考える。このとき界面間には、対象とするスケールごとに異なる結合状態が存在し、それぞれに対応する相互作用力が働いていると考えられるが、これを整理すると図-3.10 のようになる。

(1) 原子・分子スケールにはたらく相互作用力

粘土鉱物は、 Si^{4+} や Al^{3+} に O^{2-} が配位してできる四面体と、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} または Fe^{2+} イオンに O 、または OH が配位してできる八面体から構成される層状珪酸塩鉱物である。これら結晶をつくる化学結合は、静電的な力にもとづくイオン結合と、電子を共有する共有結合からなる。 Al-O 結合のような金属元素と非金属元素の結合はイオン結合であり、 Si-O のような非金属元素同士の結合は共有結合である。

(2) 単位層スケールにはたらく相互作用力

粘土鉱物の単位層は、四面体および八面体がそれぞれ規則的に並び平面状の広がりをもった四面体シートと八面体シートとが積層したものである。このスケールでの結合は、両シートがそれぞれ1対になり単位層を形成するための結合と、これら単位層同士が底面に対して垂直な方向に積層するための結合がある。前者は強い共有結合であり、後者は同形置換による電荷を中和するためのイオン結合、水素結合により結合している。

水素結合は、1:1型単位層において電荷がつりあっているときの結合様式で、層間に水分子をはさむことにより、四面体側では底面酸素と八面体側では水酸基との間で互いの極性を利用して結合している^{2,2)}。

同形置換とは、 Si 四面体シート内の Si^{4+} の位置に Al^{3+} が入ったり、 Al 八面体シートの Al^{3+} の

位置に Fe^{3+} や Mg^{2+} が入ることにより負電荷が発生する現象である。 Si 四面体シートの $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ 同形置換や、 Al 八面体シートの $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$ 同形置換が起こると、本来+4(もしくは+3)の電荷があるべきところに+3(もしくは+2)になるため、周囲の O^{2-} や OH^- の負電荷を電氣的に中和しきれず、単位層表面に負電荷を発現することになる。この電荷は溶液の pH が変化しても電荷量が変化しないため永久電荷と呼ばれている。同形置換によって発現した負電荷は、単位層間(層間)に陽イオンまたは別の八面体シートが侵入して、その正電荷によって電氣的中性条件が保たれている。このように2:1型の単位層の層間にはたらく力は、主として永久電荷を中和するための交換性陽イオンによるイオン結合力である。

(3) 粒子スケールにはたらく相互作用力

粘土粒子間には、永久電荷や端面の変異荷電に起因する静電力および粒子全体に作用する分子間力が作用するほか、周囲に分布する水との間で水和現象を示すため、水和力が作用する。これらは、互いに独立して作用するものではなく、複雑に絡み合って作用していると考えられる。

(4) ペッドスケールにはたらく相互作用力

ペッド(ped)とは、複数の粒子が凝集して団粒をなすもので、粘土の構造を構成する基本単位で物理化学的な力の作用する上限単位と見なされている^{2,3)}。このペッドは外力により比較的簡単に変形し、ペッド間においては単に機械的な力のみが作用すると考えられている^{2,4)}。

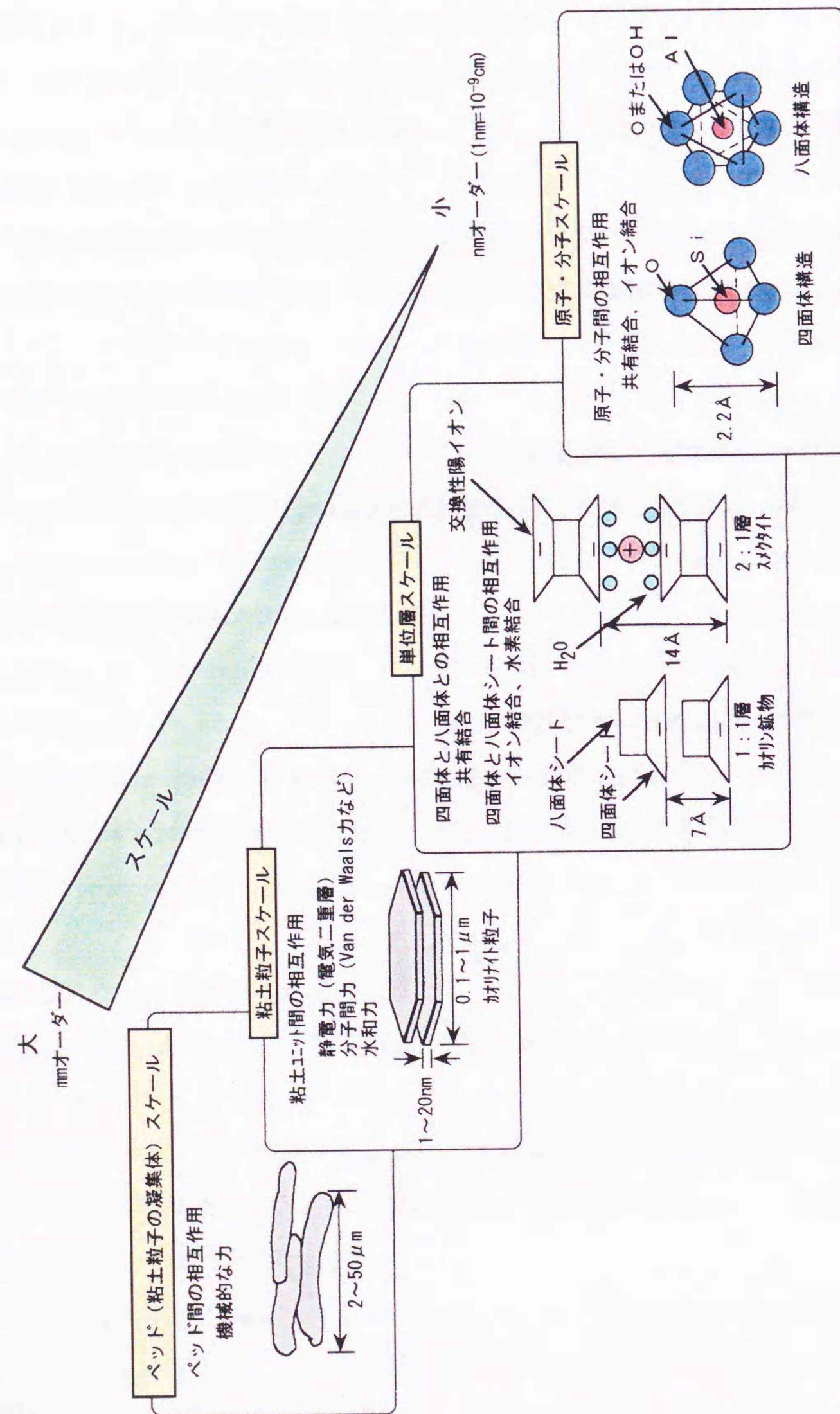


図-3.10 スケールごとの相互作用力

3.8.2 残留強度に影響を及ぼす相互作用力

以上、スケールごとの相互作用力について分類を行ったが、本節では「境界潤滑」「混合潤滑（一部）」状態での残留強度を発現している相互作用力について考察する。

実際の地すべり粘土のせん断試験から得られるせん断抵抗角 ϕ_r は 20° 以下が殆どで、すべり面深度から垂直応力は最大 300kPa 程度であることから、残留強度は大きく見積もって 100kPa 程度である。せん断面上に粘土鉱物の底面酸素が分布していることを想定して、残留強度をエネルギーに変換すると $3.3 \times 10^{-5} \text{kcal/mol}$ となる。前述のとおり、各スケールごとに作用している力は、共有結合、イオン結合、水素結合、分子間力で、各結合の結合エネルギーは表-3.1 のとおりである。実際の残留状態でのせん断により得られるエネルギーでは、イオン結合、共有結合を切断することができない。このことは、少なくとも単位層スケールまでの相互作用力は残留強度には影響していないことを示している。また、ペッドにはたらく相互作用力は、単に機械的な力のみが作用すると考えられているため、界面での電気化学的作用には関係しない。以上より、残留強度の発現に影響を及ぼす相互作用は、粒子スケールにはたらく相互作用、すなわち①静電力（電気二重層：同形置換による永久電荷と端面の変異荷電に起因）、②粒子全体に作用する分子間力（van der Waals 力など）、③水和力、であると考ええる。これら作用は複雑に絡み合っていると推定されるが、現在、すべてを明確に説明できる理論はない。コロイド科学では、粘土サスペンションにおける電気二重層と van der Waals 力との関係について、DLVO 理論 (Derjaguin Landau Verwey Overbeek) ^{25) ~ 27)} により定量的な説明がなされている (図-3.11)。しかし、この理論は粘土粒子が溶媒中に分散した状態において適用されるもので、残留状態でのせん断現象を想定した場合、粒子は垂直力により強制的に拘束されているため、条件が異なる。加えて、コロイド科学では、二つの表面または粒子が互いに 2~3nm 以内に接近すると、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で記述できなくなるとしている。その理由として、これらの連続体理論の一方または両方が小さい距離では破綻するか、あるいは、他の非DLVO力が作用しはじめるからとしている。このようなDLVO理論で説明することのできない力の総称は非DLVO力とよばれ、粒子の大きさ、構造、拡散の制限などが原因と考えられている。現実の系に対する非DLVO力の理論的研究はこれからの課題である。

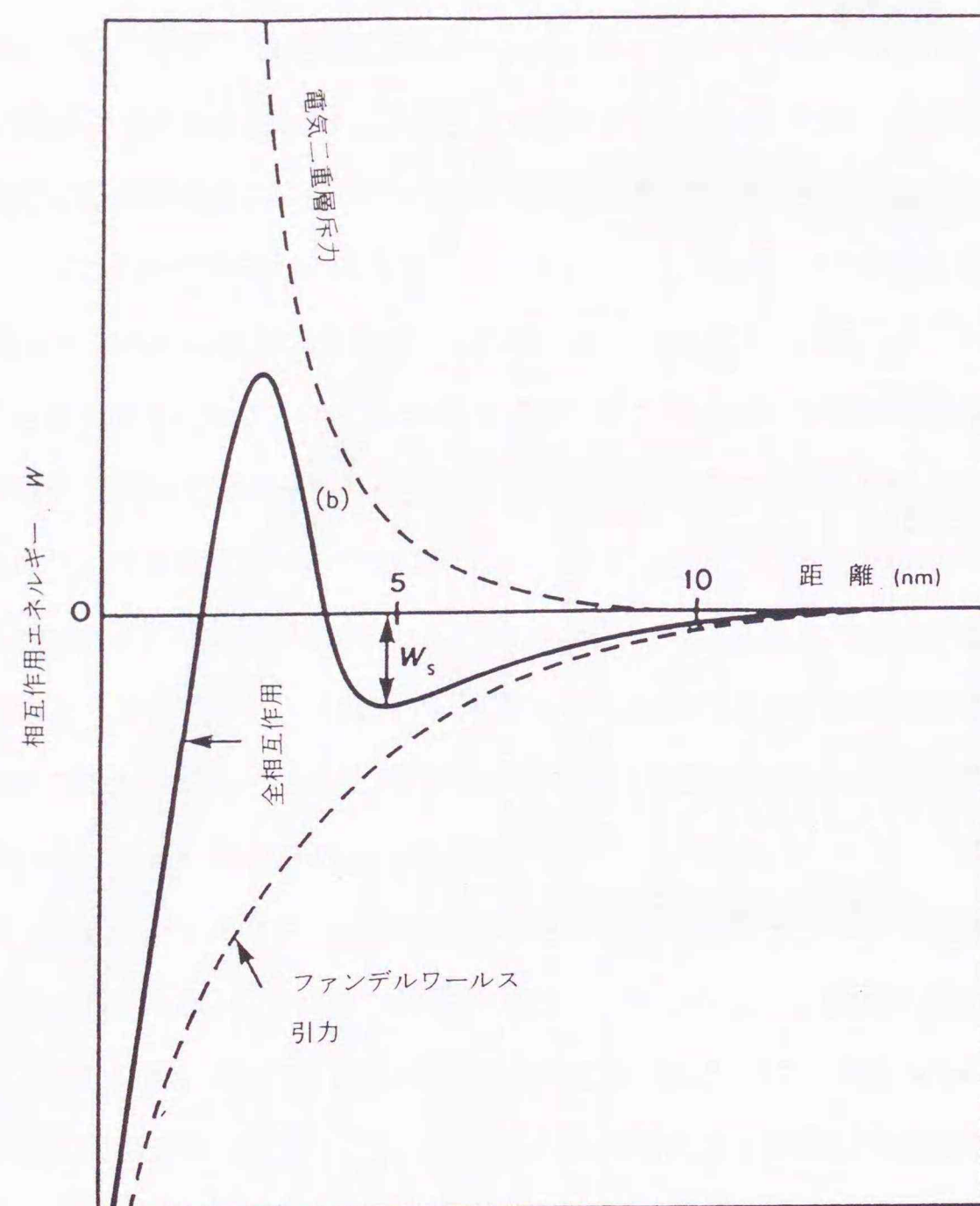


図-3.11 DLVO相互作用のエネルギー対距離プロファイルの模式図²⁷⁾

3. 9 本章のまとめ

残留状態におけるせん断現象は、粘土粒子表面間あるいは粒子表面-水との摩擦現象として理解され、残留強度の発現に粘土粒子間に作用している物理的・化学的作用が複雑に絡み合っていると考えられる。よって、粘土の残留強度発現機構を理解する上で、トライボロジーで取り扱っている摩擦や潤滑の理論、コロイド科学の粒子相互作用力が有効であり、発現機構に関わる基本概念を整理すると以下のようなものである。

- (1) 残留状態におけるせん断現象は、せん断面を境とする上下二つの面の接触による摩擦現象と理解される。この摩擦現象では吸着水を流体膜とした「潤滑摩擦」であり、せん断面を境にした相対運動であることから「すべり摩擦」に相当する。
- (2) 残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ は、間隙比一定のもと(体積変化 $\Delta V \approx 0$)での排水条件によらない真の強度定数であり、応力履歴に依存しないと仮定されることから、せん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ と摩擦係数 μ は等価である。
- (3) トライボロジーでは、固体表面間の状態をストライベック曲線により「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境界潤滑」の3領域に区分している。粘土の残留状態を想定した場合、せん断面での潤滑状態は水を流体膜とした流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑のいずれかの状態にあると推定される。
- (4) 各潤滑状態における摩擦は、主として以下の3つに起因すると考えられる。
 - ① 流体潤滑：流体膜の粘着作用(粘性)
 - ② 境界潤滑：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
一部、表面凸部同士の接触による凝着
 - ③ 混合潤滑：①、②の混在
- (5) 「流体潤滑」における流体膜の粘性は、残留強度が対数表示されたせん断速度に対して直線近似していることから、非ニュートン粘性であり、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。
- (6) 「境界潤滑」において、摩擦の一部を担う凝着力は、せん断の過程で表面凸部同士が接近することにより互いの分子間力の引力圏内に入るために起こるもので、ここでは瞬間的な固体

間の弱い結合が生じている。

- (7) 残留強度の発現に影響を及ぼす界面相互作用は、粒子スケールにはたらく相互作用、すなわち①静電力(電気二重層：同形置換による永久電荷と端面の変異荷電に起因)、②粒子全体に作用する分子間力(van der Waals力など)、③水和力、であると考ええる。これら作用は複雑に絡み合っていると推定されるが、すべてを明確に説明するための理論(非DLVO理論)の構築が今後の課題である。

<参考文献>

- 1) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M.: Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 456~462, 1987.
- 2) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・多田元彦・佐野彰: 繰返し一面せん断試験後の粘土および軟岩のせん断面のSEM観察, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, [Ⅲ-192], pp. 384~385, 1995.
- 3) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・工藤隆: 繰返し一面せん断試験によるカオリン粘土のせん断面の構造, 第35回地すべり学会研究発表講演集, pp. 329~332, 1996.
- 4) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・工藤隆: 繰返し一面せん断試験によるカオリン粘土のせん断面の構造—とくにプレカット供試体について—, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第37号, pp. 31~36, 1997.
- 5) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・棚田真: 繰返し一面せん断試験によるカオリン粘土のせん断面の構造と形成過程, 第36回地すべり学会研究発表講演集, pp. 237~240, 1997.
- 6) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・棚田真: 圧密定体積条件での繰返し一面せん断試験によるカオリン粘土のせん断面の構造, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, [Ⅲ-A53], pp. 106~107, 1997.
- 7) 宜保清一・江頭和彦・林義隆: 地すべり土の残留強度の大変位せん断試験による測定法と物理的・鉱物学的性質による類推法, 農業土木学会論文集, 第159号, pp. 57~63, 1992.
- 8) 広辞苑, 岩波書店, 1995.
- 9) Loomis W. R.: NEW DIRECTIONS IN LUBRICATION, MATERIALS, WEAR, AND SURFACE Interactions, Noes Publications, No. 579, 1985.
- 10) トライボロジー辞典, 日本トライボロジー学会編, 養賢堂, 1995.
- 11) 田中久一郎: 摩擦のおはなし, 日本規格協会, 1995.
- 12) 京極啓史: 潤滑のからくり, 役に立つトライボロジー(基礎編), 日本機械学会, 1997.
- 13) 吉村成彦: 潤滑と油の特性, 役に立つトライボロジー(基礎編), 日本機械学会, 1997.
- 14) 中川: レオロジー, みすず書店, 1959.
- 15) 鈴木素之: リングせん断試験による土の残留強度に関する基礎的研究, 信州大学博士論文, 1998.

- 16) J. ホーリング編 (松永正久監訳) : トライボロジー, 近代科学社, 1984.
- 17) H. チコス (桜井俊男監訳) : トライボロジー, 講談社, 1980.
- 18) Eyring, H (長谷川繁夫・平井西夫・後藤春雄訳) : 絶対反応速度論(下), 吉岡書店, pp. 500~514, 1966.
- 19) 柴田徹・村山朔郎: 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集, No. 40, pp. 1~31
- 20) 粘土の不思議, 土質工学会, 1986.
- 21) 中前勝彦・水町浩・浦濱圭彬: 接着・粘着の化学と応用, 大日本図書, 1998.
- 22) 白水晴雄: 粘度鉱物学 - 粘土科学の基礎 -, 朝倉書店, 1993.
- 23) 松尾新一郎・嘉門雅史: 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, 1976.
- 24) 土の物理学 - 土質工学の基礎 -, 土壤物理研究会, 森北出版, 1981.
- 25) Derjaguin, B. V. and Landau, L. : Acta Physicochim, URSS 14, pp. 633~662. 1941.
- 26) Verwey, E. J. W. and Overbeek, J. Th. G. : Theory of Stability of Lyophobic Colloids, Elsevier, Amsterdam, 1948.
- 27) J. N. イスラエルアチヴィリ: 分子間力と表面力 (近藤保/大島広行訳), 朝倉書店, 1996

第4章 繰り返し一面せん断試験方法に関する影響要因

4. 1 概 説

繰り返し一面せん断試験機は、不攪乱試料による試験の実施や、小型・軽量化による現場での試験の実施など、試料の適用条件と実務性に優れている。しかし、残留状態に至るまでの大変位をせん断方向が逆転する繰り返しせん断により与えているため、実際の地すべりでの一方向せん断とはせん断機構が異なっている。従来より繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度がリングせん断試験より大きいとの報告^{1)~3)}があり、せん断方向の逆転による粒子の乱れの影響が懸念されている。残留状態におけるせん断面の構造については、Nakamoriら⁴⁾、Giboら⁵⁾、岸本ら⁶⁾によって研究がなされている。Nakamoriら⁴⁾は、不攪乱試料と繰り返し試料を用いた繰り返し一面せん断試験を行い、形成されたせん断面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察し、不攪乱試料と繰り返し試料でせん断面表面を構成する粒子の間隙が異なると報告している。Giboら⁵⁾は、粘土の繰り返し試料を用いたリングせん断試験を行い、せん断面表面のX線回折プロファイルから、せん断変位の増加に伴い粒子配向が進展することを確認している。また、岸本ら⁶⁾は試作した「中距離剪断試験機」を用いて、カオリン粘土の大変位一面せん断試験を行い、水平変位300mmに至るまでのせん断面の構造をX線写真をもとに粒子の配向性を評価している。これらは、いずれも室内せん断試験により形成されたせん断面の構造と粒子配向を評価したものであるが、繰り返し一面せん断試験によるせん断面の構造を試験条件ごとに評価したものではない。実務上の観点から残留強度の妥当性を検討する場合、試験条件ごとの比較検討が必要である。

また、繰り返し一面せん断試験ではせん断の過程でせん断箱が互いにずれるため、せん断箱と供試体せん断面とが接触する。そのため、せん断中に測定されるせん断力には、せん断箱と供試体せん断面間の接触による摩擦力が含まれている。ピーク強度と完全軟化強度は、上下せん断箱が互いにずれているときに得られる値であり、摩擦力の影響を検討する必要がある。現在、各種計測機器の小型・高精度化が進んでおり、技術的には摩擦力を測定することが可能となっている。

このほか本試験では、残留状態を得るまでの多数回の繰り返しせん断において、せん断箱端面のエッジ効果によりせん断箱隙間から試料漏れが発生する。漏れた試料は、上下せん断箱の隙間に挟まり摩擦となるため、せん断力の測定値に影響を与えている。従来、上下せん断箱隙間から漏出した試料とせん断箱との間で生じる残留状態における摩擦力については、その影響が懸念されているものの定量的評価はなされてこなかった。なお、このようなせん断箱隙間からの試料漏れは、特に工夫を行わない限りリングせん断試験機でも発生しており⁷⁾、大変位を与えるタイプの試験機には発生する問題のようである。

これらはいずれも繰り返し一面せん断試験のせん断機構に起因するもので、このほか試験の種類に関係なく残留強度に影響する要因としてせん断速度が指摘されている。従来の研究によると、粘土の残留強度がせん断速度に対して依存性を示すものと示さないものがあり、粘土含有量や I_p といった粘土の物性との関係が示唆されている^{7)~9)}。第3章で論じたとおり、粘土の物理的・化学的性質は残留強度の発現機構に密接に関与するものであることから、残留強度がせん断速度の影響を受ける機構解明のためには、発現機構すなわちせん断面間での摩擦現象について理解することが重要と考える。

以上より、繰り返し一面せん断試験結果に及ぼす影響要因として、せん断方向の逆転による粒子の乱れの影響、せん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力の影響、上下せん断箱隙間からの試料漏れによるせん断箱間に作用する摩擦力の影響を、試験の種類に関係なく残留強度に影響を及ぼす要因としてせん断速度との関係を明らかにし、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と試験条件について検討しなければならない。

4. 2 せん断面の構造に及ぼすせん断方向逆転の影響

4.2.1 繰り返し一面せん断試験による粘土のせん断面の構造と形成過程

圧密定圧、圧密定体積およびプレカット供試体による圧密定圧の3つの試験条件の下で繰り返し一面せん断試験を行い、試験後のせん断面の層構造と粒子の配向性を電子顕微鏡写真を用いた定量的手法により評価した。試料および試験条件は表-4.1のとおりである。定圧試験ならびに定体積試験はともに3t法により圧密を打ち切った後、せん断を開始した。またプレカット供試体は、圧密打ち切り後に直径0.26mmの糸を初回のせん断方向に対して逆方向に交互に引いて作製した(図-4.1)。試験に供した試料は、北海道南白老鉱山において製紙用原料として精製されているカオリン粘土で、蒸留水を加え含水比200%以上で練り返して10日間予圧密したものを供試体とした。SEM観察によると、カオリン粘土を構成する粒子は、単独では存在せず複数の粒子が集合したペッド(ped)¹⁰⁾として存在している。ペッドの形状は、長軸方向の長さ10~20 μ m、厚さ1~5 μ mの板状を呈している(写真-4.1)。なお、圧密定圧、圧密定体積およびプレカット供試体による圧密定圧条件の3条件を、それぞれ定圧試験、定体積試験およびプレカット定圧試験と呼ぶ。

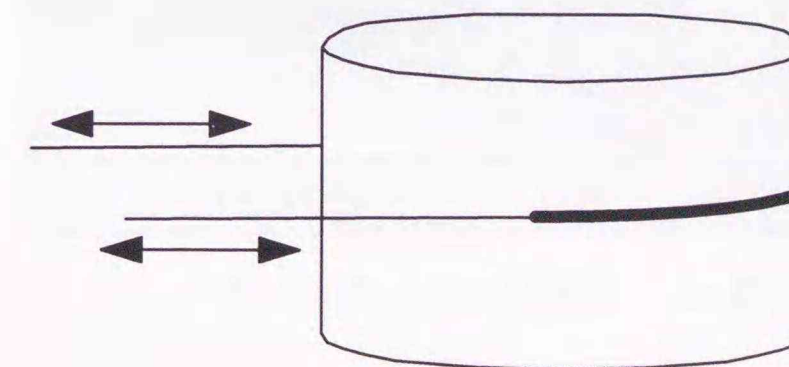


図-4.1 プレカット供試体の作製方法

表-4.1 試料および試験条件

試料	試料名	カオリン粘土 ($W_L=56\%$, $IP=26$)
	供試体寸法	直径60mm, 高さ40mm
	供試体のセット方向	$\delta=0^\circ$
試験条件	試験条件	圧密定圧条件, 圧密定体積条件
	圧密圧力	600kPa
	せん断速度	0.5mm/min
	水平変位量	前後それぞれ6mm
	累積水平変位量	6mm(せん断方向逆転前の一面せん断状態)
		48mm(くり返し回数2回)
		720mm(くり返し回数30回)

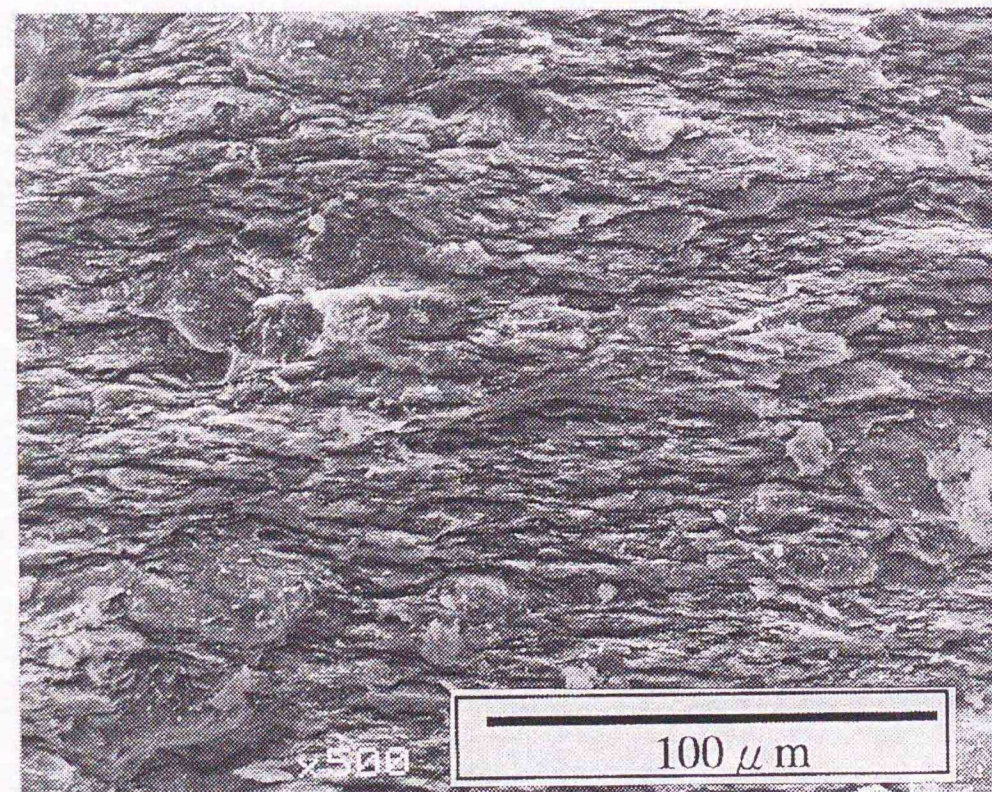


写真-4.1 カオリン粘土のSEM像

(1) SEMによるせん断面の構造観察

SEM観察用の試料は、図-4.1aに示したように供試体中央から2つに破断し、これをさらに5分割して作製した。これら分割片を断面方向から観察し、得られたSEM写真をスキャナーでマイクロコンピュータに読み取り、せん断面を構成するベットの配向方向を画面上で直接測定した。この手法は手間がかかるものの、X線回折による評価手法のように装置への試料セットの問題がない。測定結果は図-4.2aに示したように配向方向を α° として 10° 間隔の度数分布として集計し、以下に示す配向度¹⁾で評価した。

$$M = \frac{100}{\sum n_i} \sqrt{(\sum n_i \sin 2\bar{\theta}_i)^2 + (\sum n_i \cos 2\bar{\theta}_i)^2} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

M:配向度

n_i :頻度分布での 10° ごとに含まれるベット数

$\bar{\theta}_i$:それぞれの間隔における平均方向

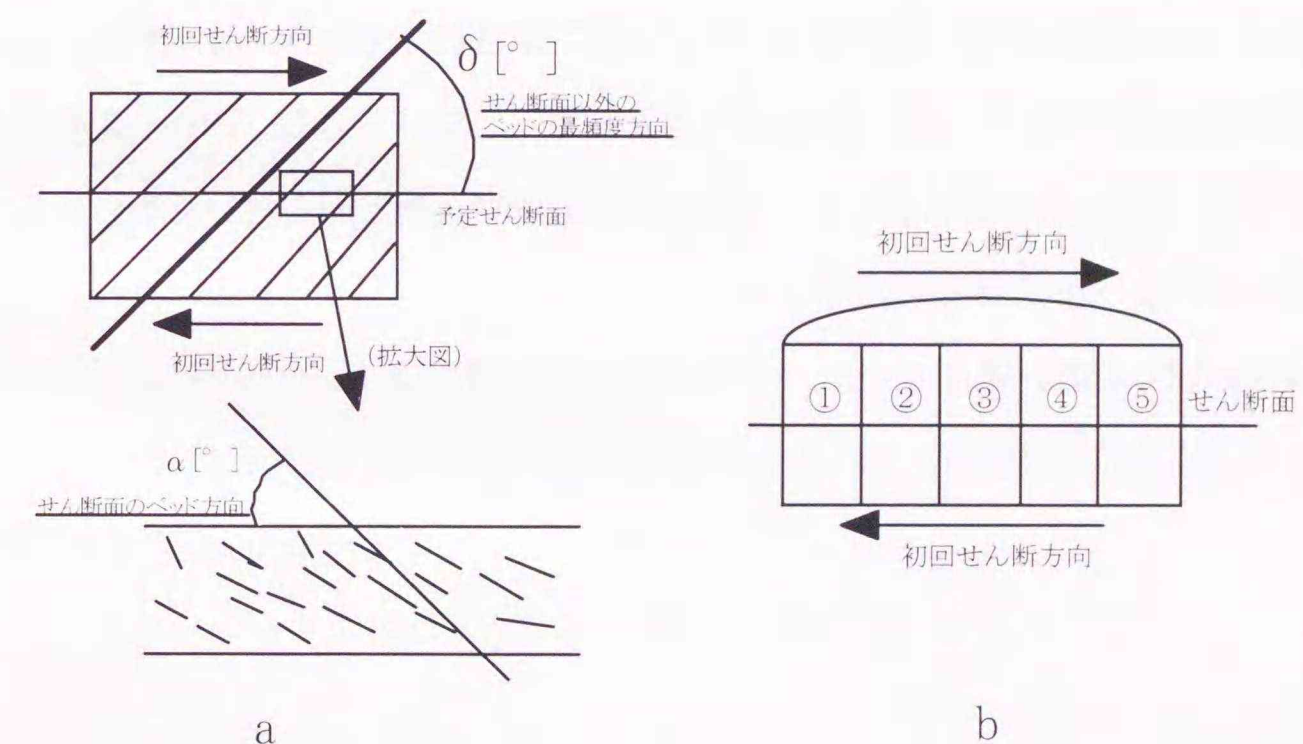


図-4.2 δ , α とSEM観察用供試体の分割方法

a. 定圧試験

水平変位 6 mm 供試体

せん断面付近のSEM像を写真-4. 2に示す。この供試体は自然乾燥後、せん断面を境に上下2つに分離した。写真は上部供試体のSEM像でせん断面は写真下部に相当する。

SEMで観察されるところのせん断面は、ベッドが花卉状を呈して折り重なっており、これら再配列挙動が認められる範囲、つまり主変位せん断面の幅は $10\sim 50\mu\text{m}$ に限られている。主変位せん断面を構成するベッドの配向度は、上下供試体の平均で $M=79.8\%$ 、配向方向の最頻値 $\alpha_{\text{mode}}=0^\circ$ である。

累積水平変位 48mm 供試体

せん断面付近のSEM像を写真-4. 3に示す。この供試体もせん断面を境に上下2つに分離した。写真は下部供試体のSEM像である。

せん断面は、複数の変位せん断面とこれに挟まれた層状部からなる”せん断層”をなしている。主変位せん断面直下の厚さ約 $20\mu\text{m}$ の範囲では、ベッドが再配列して湾曲構造を呈している。

図-4. 3に主変位せん断面の配向頻度分布を示す。配向度は、 $M=97.3\%$ と極めて高く、しかも最頻度配向方向 $\alpha_{\text{mode}}=0^\circ$ であることから、ほぼ完全配向している。

累積水平変位 720mm 供試体

写真-4. 4にせん断面付近のSEM写真を示す。写真に示されたとおり、せん断面には多数の変位せん断面が形成されており、厚さ約1mmの”せん断層”となっている。これら変位せん断面に挟まれた厚さ $50\sim 100\mu\text{m}$ の層状部では、ベッドが初回のせん断方向に対して順目あるいは逆目方向に傾斜している（順目・逆目ベッドゾーン）。

図-4. 4は、これら順目・逆目ベッドゾーンの配向頻度分布である。ベッドは $\alpha_{\text{mode}}=40^\circ$ （順目）、 -50° （逆目）の2方向を最頻値とし、各々の配向度は順目 $M=68.4\%$ 、逆目 $M=77.5\%$ である。

b. 定体積試験

水平変位 6 mm 供試体

SEMで観察されるところのせん断面は、水平変位6mmの時点で既に1mm程度の厚さをもつ”せん断層”をなし、せん断層を構成しているベッドの配向方向は、図-4. 5に示されるように全体的に順目方向に傾斜している。

累積水平変位 48mm 供試体

この供試体もせん断面を境に上下2つに分離し、写真-4. 5に示されたSEM像は上部供試体である。

せん断面の厚さは約1. 8mmで水平変位6mmのときよりさらに厚くなっている。せん断層には、連続性に乏しい複数の変位せん断面が形成されている。

累積水平変位 720mm 供試体

写真-4. 6にせん断面付近のSEM像を示す。

せん断面の厚さは約3mmで今回の実験のなかでは最も厚い。変位せん断面の方向ならびに層内のベッドの配向方向は不規則なものが多く、せん断層は攪乱帯の様相を呈している。変位せん断面の配向度は、 $M=71.4\%$ と配向度が低くなっている。

c. プレカット定圧試験

プレカット直後の供試体（水平変位 0mm）

プレカット直後のカット面付近のSEM像を写真-4.7に示す。

SEMで観察されるところのカット面は、0.3mm程度の厚さをもつ“カット層”をなしている。このカット層は、カットと反対方向に凸部をもった弓状の構造を呈し、カット時の交互に引いた糸の輪郭が残ったものと考えられる(図-4.6)。カット層と不撓乱部との境界部には、波状あるいは階段状の分離面($M=60.1\%$, $\alpha_{mode}=-10^\circ$)が形成されている。

水平変位6mm供試体

写真-4.8にせん断面付近のSEM像を示す。この供試体は、先のプレカット直後供試体と同方向の破断面の作製に失敗したため、反対側から見たときのせん断面である。

せん断面は、厚さ約0.15mmの“せん断層”として観察され、層の厚さはプレカット時の1/2に減少している。せん断層は、上部・中部・下部の3面の変位せん断面とこれら変位せん断面に挟まれた順目・逆目ベッドゾーンからなる“くの字状構造”を呈している。

せん断層なかほどの凸部付近に形成されている主変位せん断面は、配向度 $M=79.2\%$ とプレカット時の分離面の配向度($M=60.1\%$)より高い値を示している。また、せん断層内部の順目・逆目ベッドゾーンの配向頻度分布は、下部の順目ベッドゾーンの配向度が $M=74.6\%$ と比較的高いのに対し、上部の逆目ベッドゾーンの配向度は $M=16.7\%$ と非常に低い値を示しているのが特徴的である(図-4.7)。

累積水平変位48mm供試体

写真-4.9は上部供試体のSEM像で、主変位せん断面は写真下部にあたる。

せん断面の構造は、ここでも“くの字状構造”を呈しているが、主変位せん断面の発達が極めて良好である。SEM写真の下部に示されるように主変位せん断面を構成しているベッドは、面に平行に折り重なるように配向している。配向度は $M=99.2\%$ と極めて高く、最頻度配向方向は $\alpha_{mode}=0^\circ$ で、ほぼ完全配向している。

累積水平変位720mm供試体

せん断面付近のSEM像を写真-4.10に示す。写真に示されたとおり、せん断層は厚さ約0.1mmの明瞭な“くの字状構造”を呈している。主変位せん断面の配向度は $M=87.1\%$ で、前述の累積水平変位48mmのときに比べ低くなっているものの、最頻度配向方向は $\alpha_{mode}=0^\circ$ であり、依然、配向状態は良好である。

以上より、定圧試験におけるせん断面（層）は、複数の変位せん断面とそれに挟まれた順目・逆目ベッドゾーンからなり、定体積試験では、連続性に乏しい複数の変位せん断面と撓乱帯からせん断面（層）が構成されている。また、プレカット定圧試験におけるせん断面は、上部・中部・下部の3面の変位せん断面とそれに挟まれた順目・逆目ベッドゾーンからなる“くの字状構造”を呈する。

また、せん断面の厚さは、定体積試験>定圧試験>プレカット定圧試験の順で、定圧試験と定体積試験では、せん断変位の増加に伴いせん断層の厚さが増加するのに対し、プレカット定圧試験では、せん断変位に関係なくほぼ一定である。

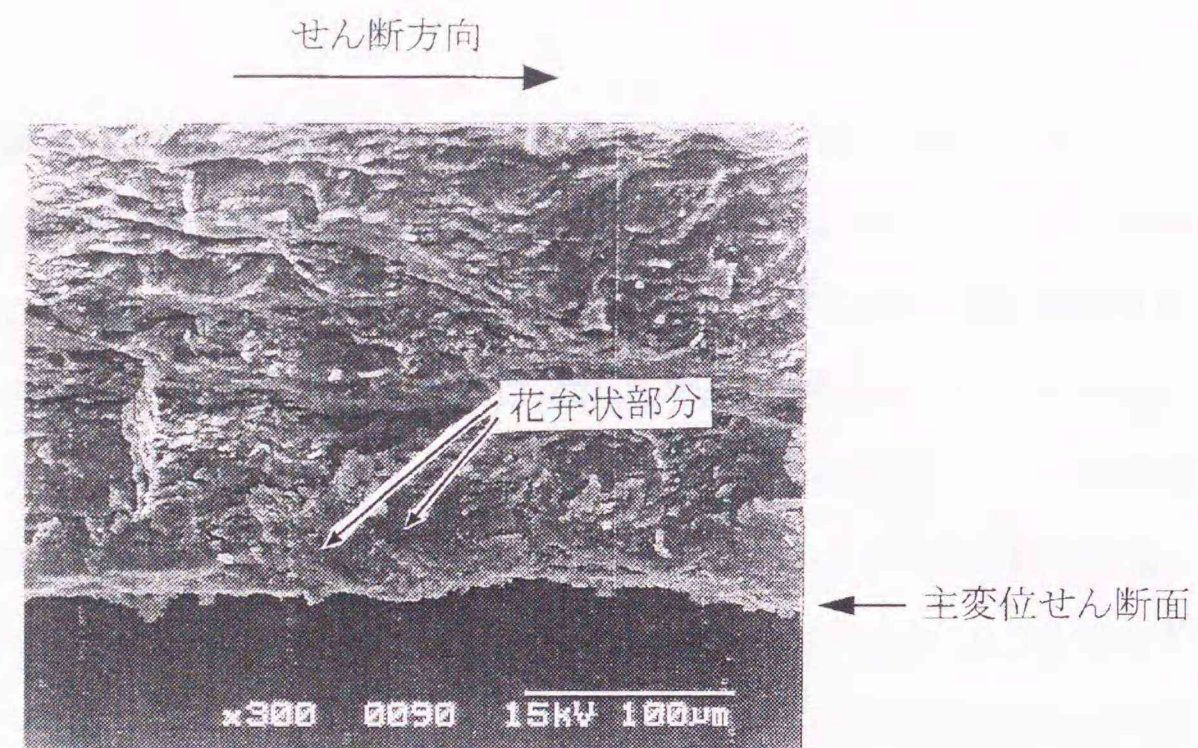


写真-4.2 せん断面のSEM像
(圧密定圧条件：水平変位 6 mm)

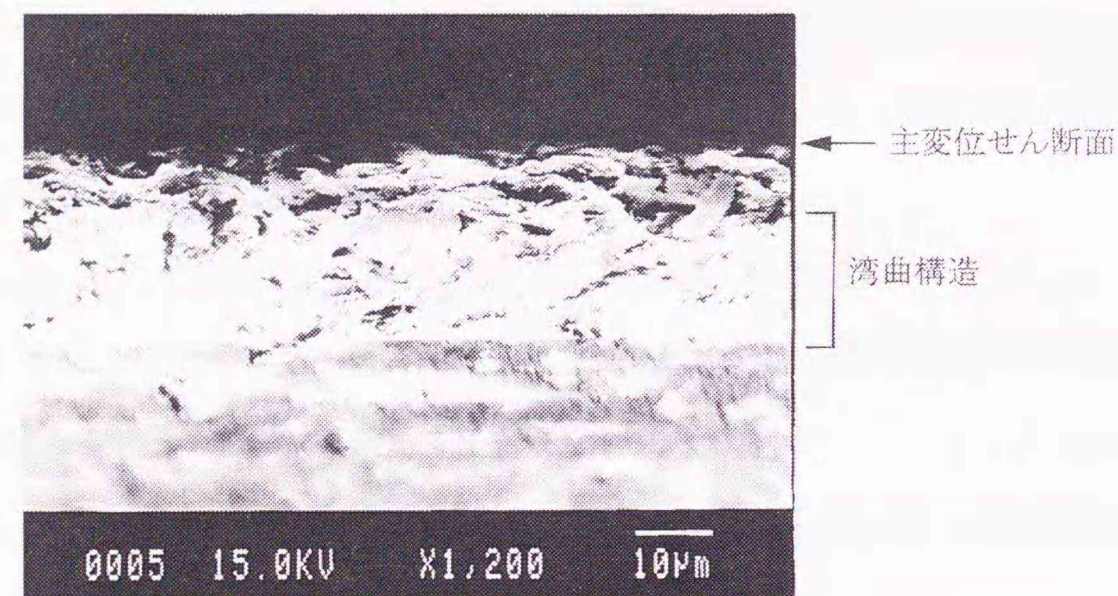


写真-4.3 せん断面(層)のSEM像
(圧密定圧条件：累積水平変位48mm)

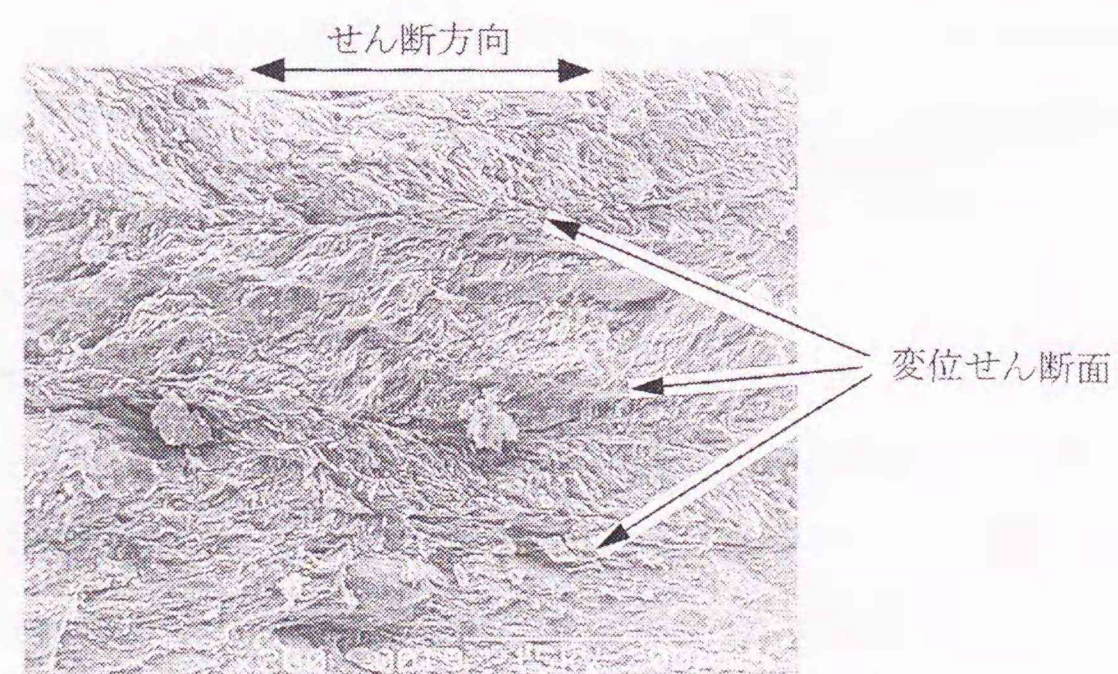


写真-4.4 せん断面(層)SEM像
(圧密定圧条件：累積水平変位720mm)

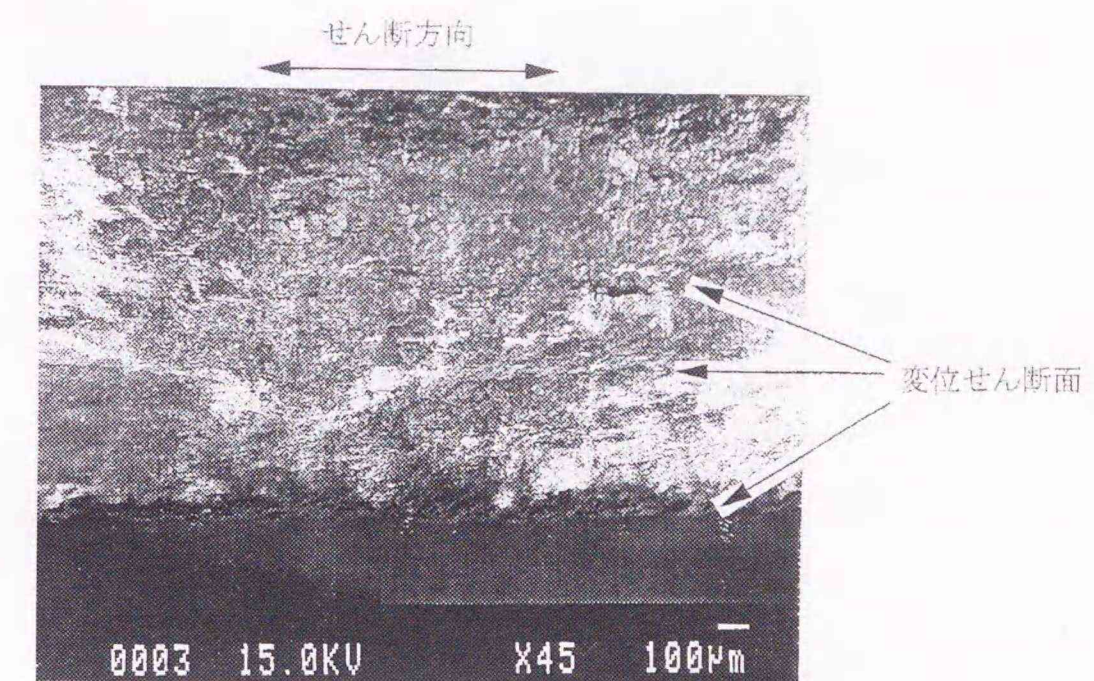


写真-4.5 せん断面(層)のSEM像
(圧密定体積条件：累積水平変位48mm)

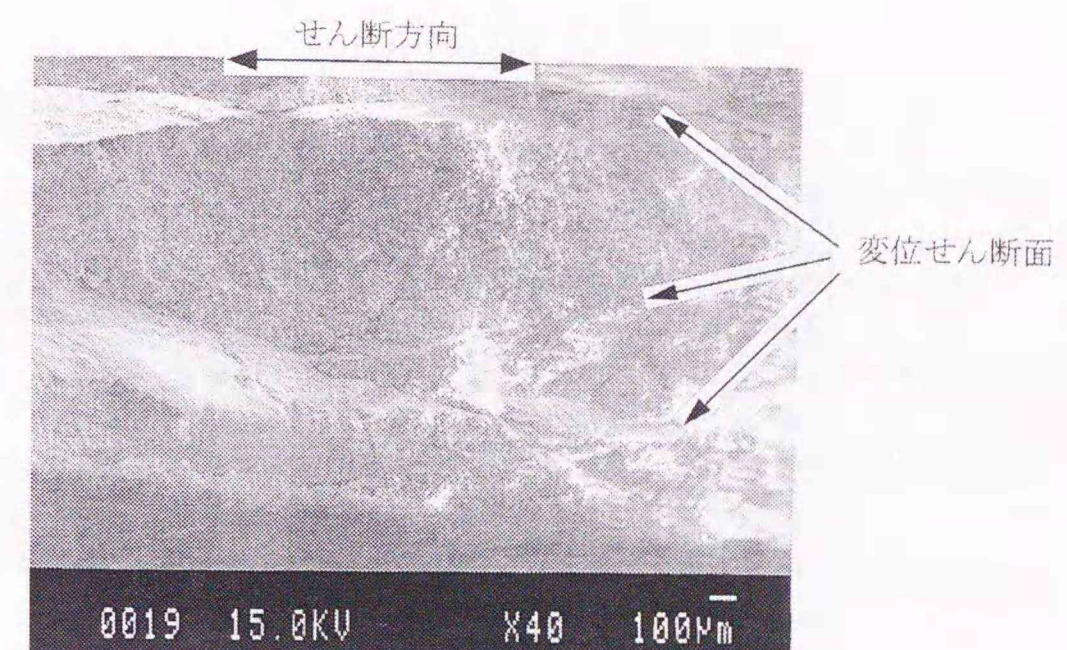


写真-4.6 せん断面(層)のSEM像
(圧密定体積条件：累積水平変位720mm)

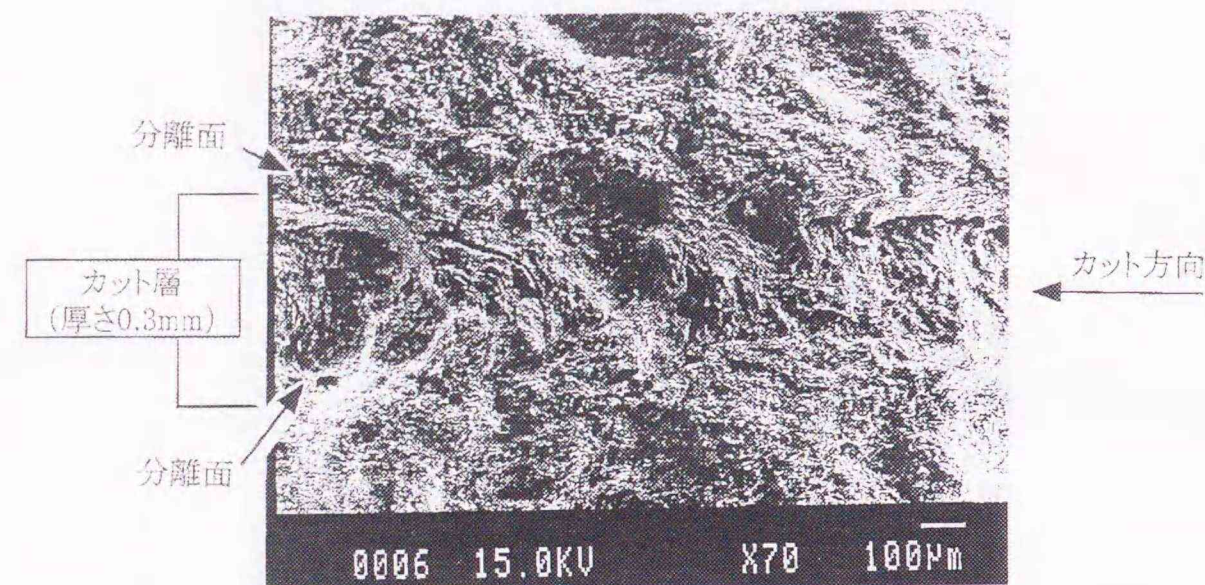


写真-4.7 プレカット面(層)付近のSEM像
(圧密定圧条件：水平変位0mm)

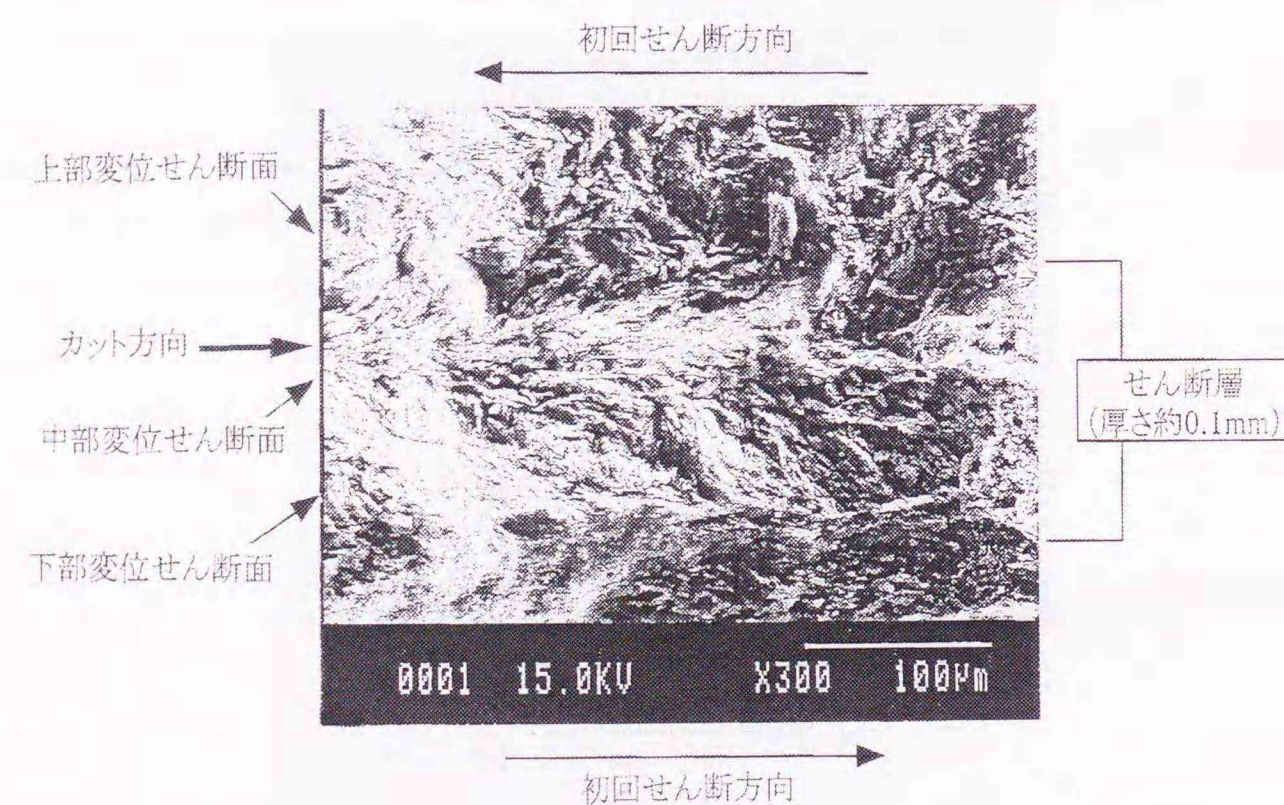


写真-4.8 せん断面(層)付近のSEM像
(プレカット供試体：水平変位6mm)



写真-4.9 せん断面付近のSEM像
(プレカット供試体：累積水平変位48mm)

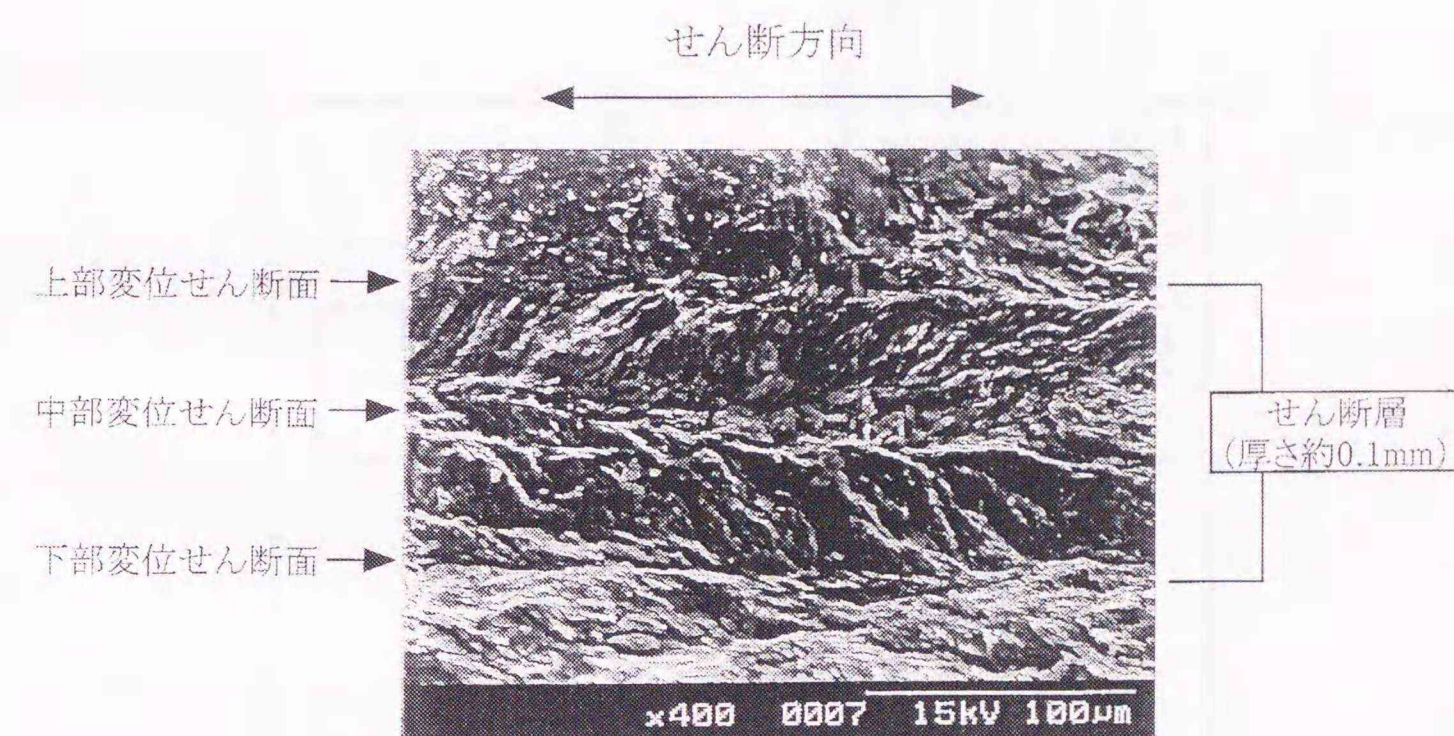


写真-4.10 せん断面(層)付近のSEM像
(プレカット供試体：累積水平変位720mm)

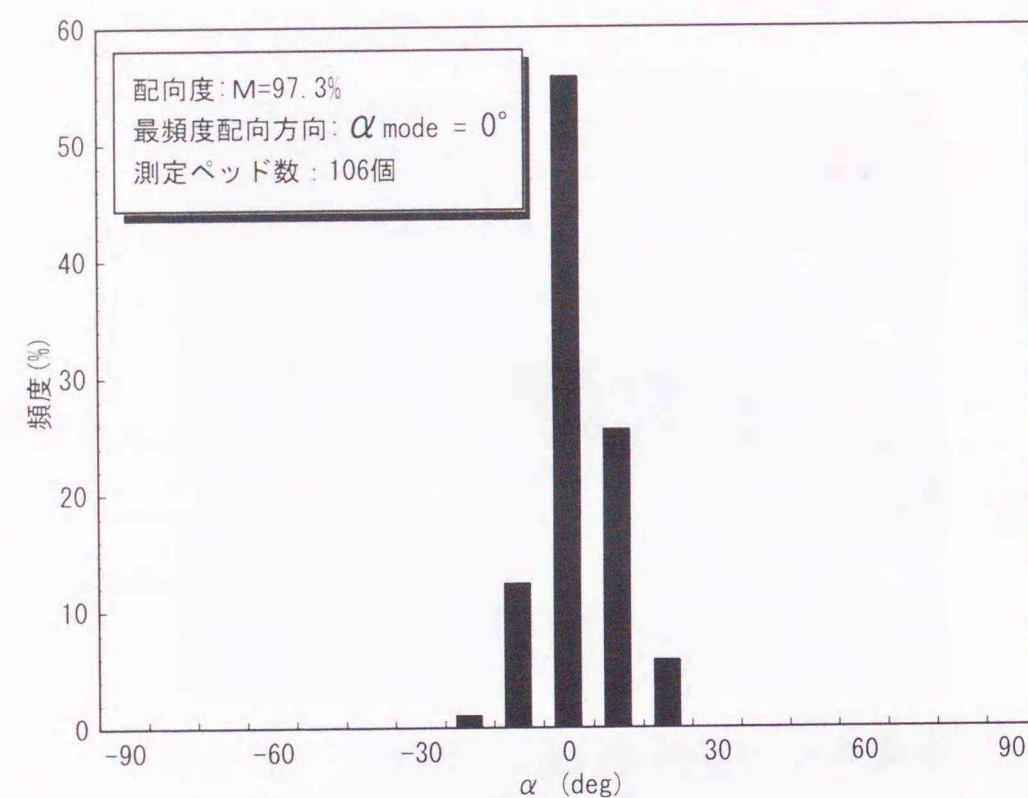


図-4.3 主変位せん断面の配向頻度分布
(圧密定圧条件: 累積水平変位48mm)

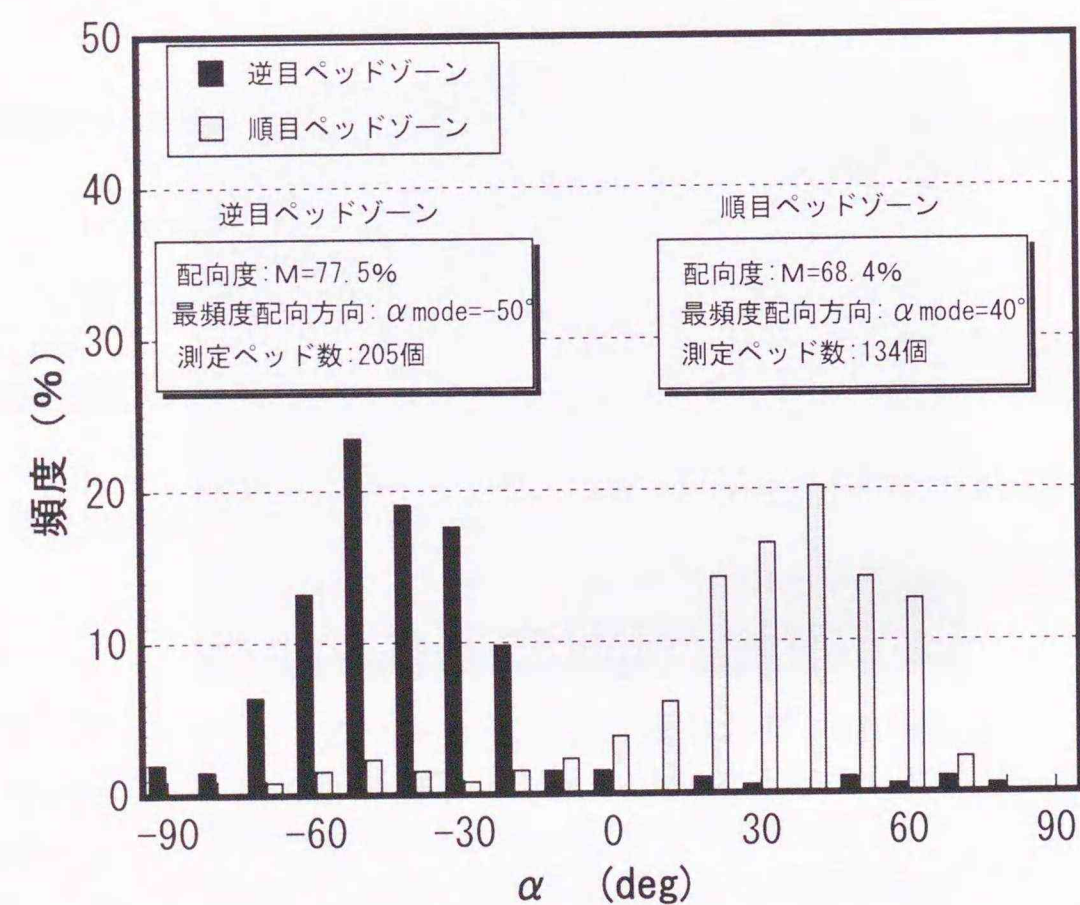


図-4.4 順目・逆目ベッドゾーンの配向頻度分布
(定圧圧密条件: 累積水平変位720mm)

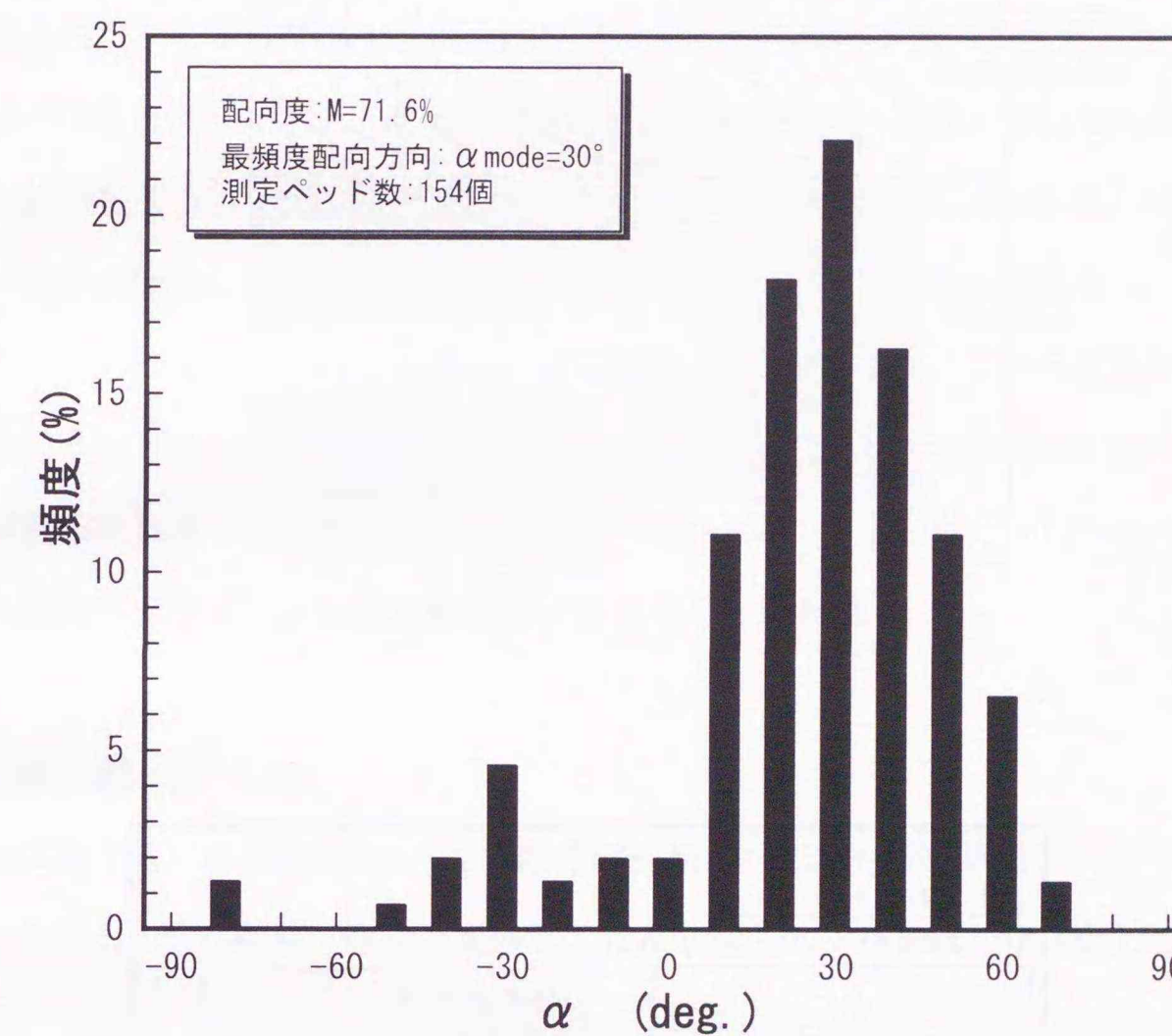


図-4.5 せん断面(層)のベッドの配向頻度分布
(圧密定体積条件: 水平変位6mm)

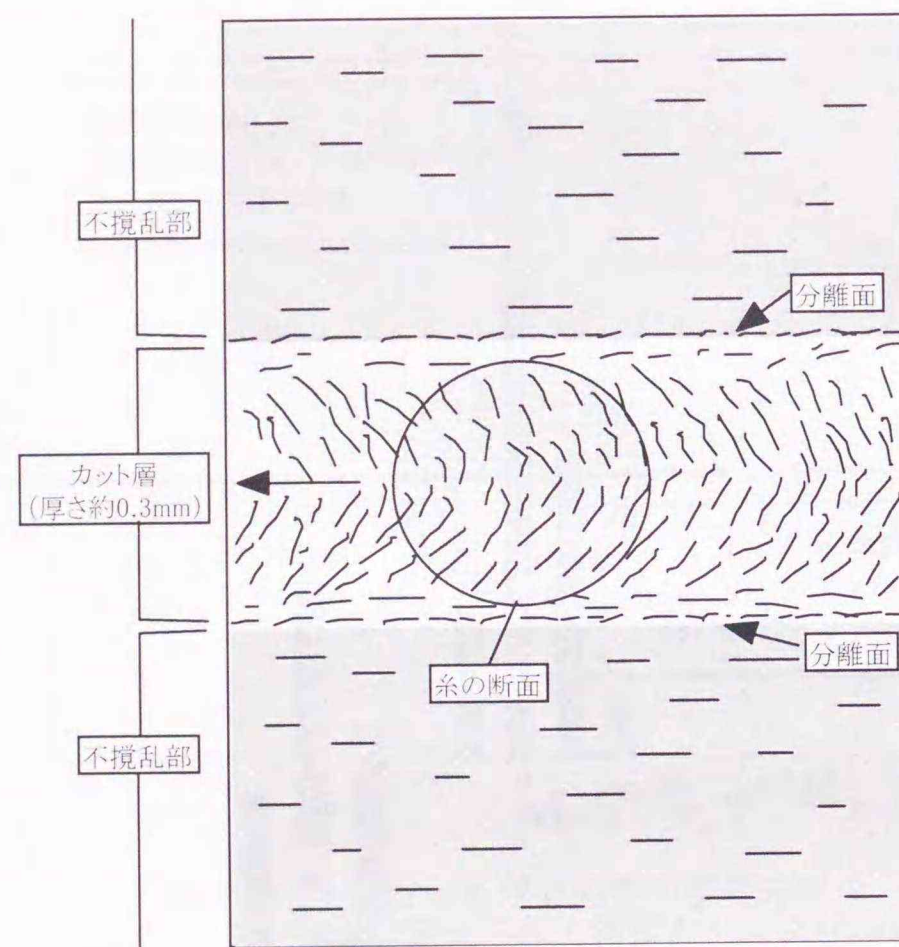


図-4.6 プレカット層の模式図

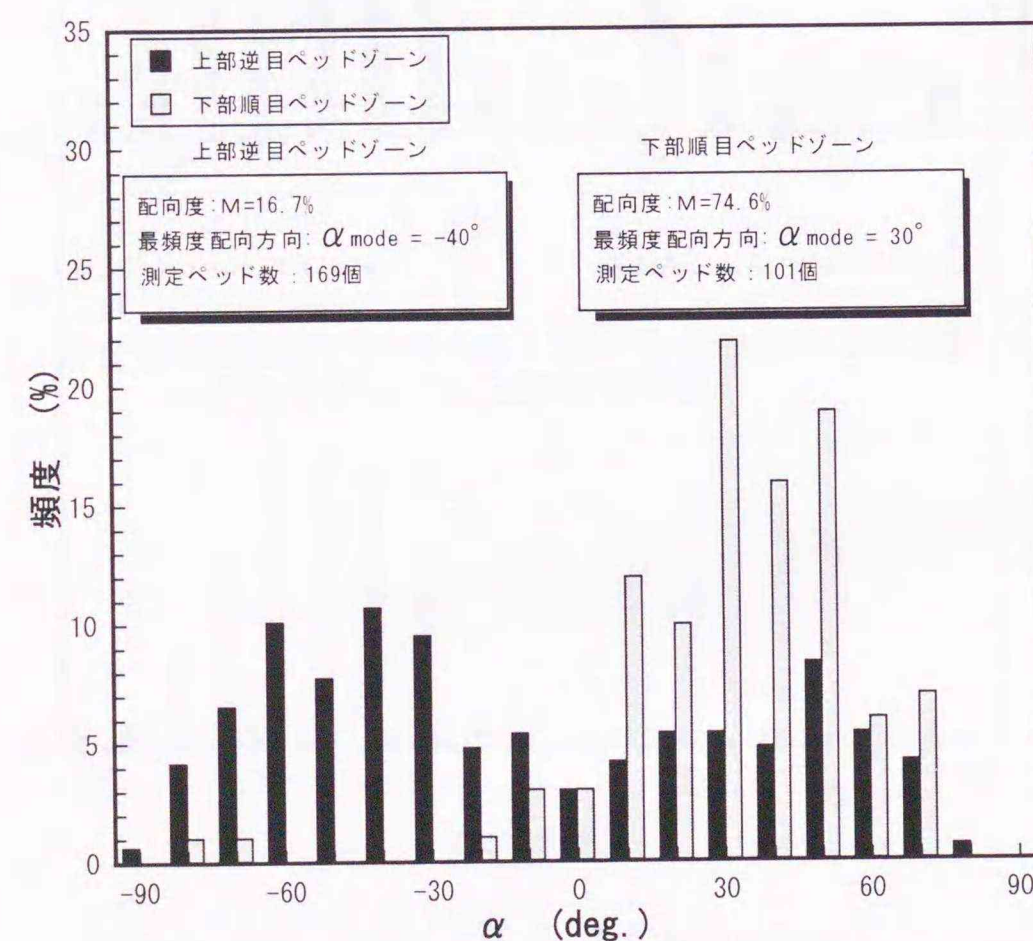


図-4.7 順目・逆目ベッドゾーンの配向頻度分布
(プレカット供試体: 水平変位6mm)

(2) せん断面の形成過程

前節のせん断面の観察結果より、繰り返し一面せん断試験によるせん断面の形成過程は次のようである。

a. 定圧試験 (図-4.8a)

水平変位6mm (せん断方向逆転前の一面せん断試験と同じ状態) では、連続する主変位せん断面が形成される。この主変位せん断面は、繰り返しせん断移行後の累積水平変位48mm (繰り返し回数2回) になるとほぼ完全配向する。このときのせん断面は、複数の変位せん断面とこれに挟まれた層上部からなる”せん断層”をなしている。また、主変位せん断面直下の約20μmの範囲では、ベッドが再配列した湾曲構造を呈している。累積水平変位720mmになると、さらに多くの変位せん断面が形成され、これによりせん断層は厚さ約1mmになる。これら変位せん断面に挟まれた層状部のベッドは、変位せん断面形成時のせん断方向に対して順目方向に傾斜するため、せん断方向が逆転する繰り返しせん断では、順目のほか、見かけ上逆目方向にベッドが傾斜している (順目・逆目ベッドゾーン)。

b. 定体積試験 (図-4.8b)

定体積試験では、水平変位6mm (せん断方向逆転前) において、既にせん断面は複数の変位せん断面からなる”せん断層”をなしている。せん断層内のベッドは、全体として順目方向に傾斜している。その後、繰り返し一面せん断に移行し累積水平変位が48mmになると、せん断層はさらに厚くなり約1.8mmとなる。層内の変位せん断面は、一般に連続性が乏しく、SEM観察時の視認性が悪い。さらに変位が進み累積水平変位720mmになると、せん断層の厚さは約3mmに達する。このとき、変位せん断面に挟まれた層状部のベッドは、配向が不規則な攪乱帯の様相を呈する。

c. プレカット定圧試験 (図-4.8c)

プレカット直後のカット面は、カットと反対方向に凸部をもつ弓状構造をなしている。カット面の厚さは約0.3mmで糸の直径 ($\phi=0.26\text{mm}$) より若干大きく、カット面と不攪乱部分の境界には波状あるいは階段状の分離面が形成されている。この分離面は、せん断開始後、変位せん断面に転化する。水平変位6mmでは、これら分離面が転化した変位せん断面がせん断層上下付近に分布するほか、弓状構造の凸部付近に新たに変位せん断面が形成される。このときのせん断面の厚さは

約0.15mmとカット時の1/2に縮小している。せん断面は、この凸部付近に新たに形成された変位せん断面により上層と下層に2分され、ペッドはそれぞれ順目・逆目方向に配向する。これによりプレカット供試体に特有の”くの字状構造”が形成される。これら3面の変位せん断面は、繰返しせん断移行後の累積水平変位48mmのときに、とくに配向性が良好でほぼ完全配向している。これら上部・中部・下部の変位せん断面と順目・逆目ペッドゾーンからなる”くの字状構造”は累積水平変位720mmのときまで維持される。

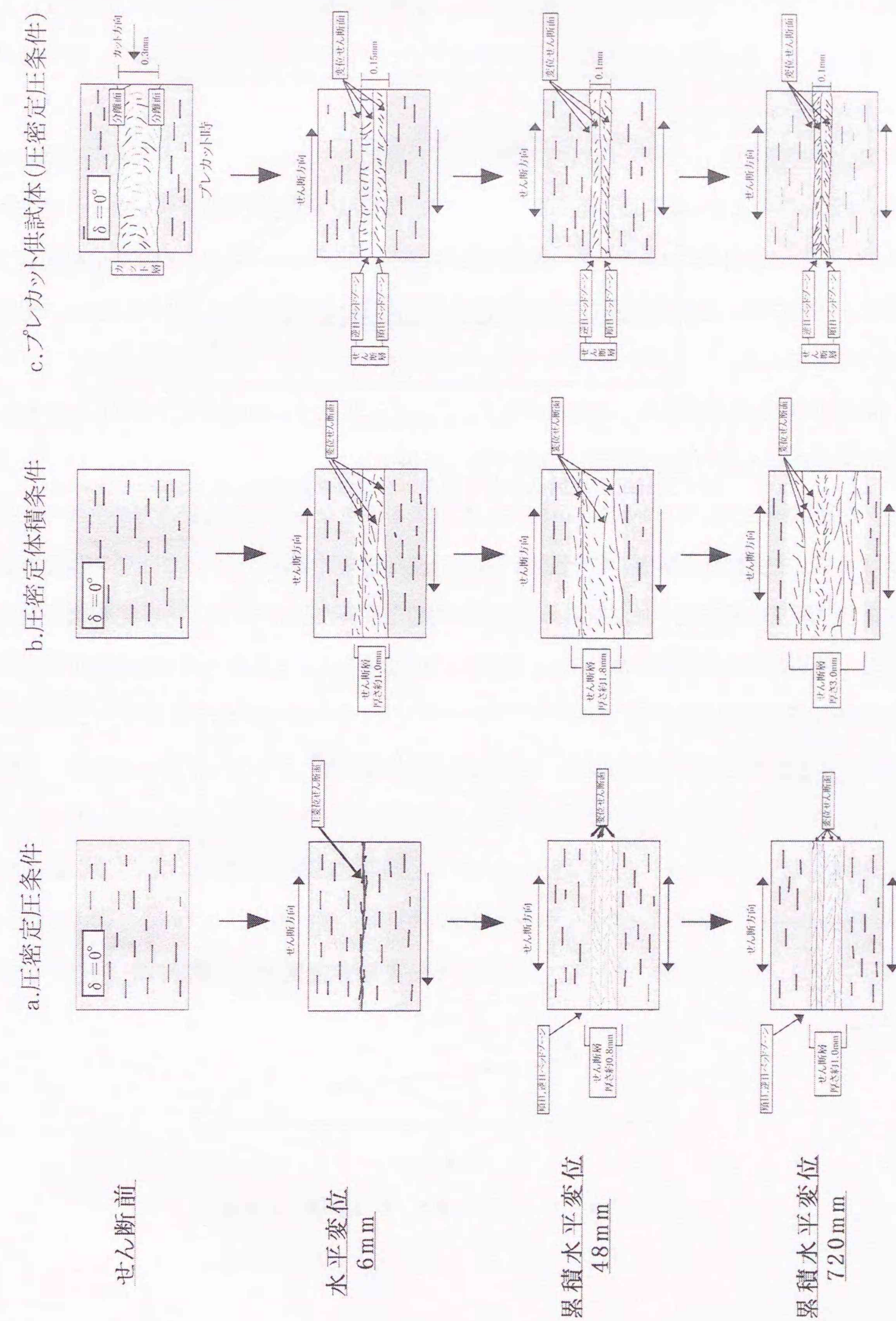


図-4.8 各試験条件におけるせん断面（層）の形成過程

(3) せん断面の配向度とせん断応力との関係

各試験条件における主変位せん断面の配向度(M)－累積水平変位(HD)関係を図-4.9に示す。主変位せん断面とは、せん断により供試体が相対変位するとき、その境界面をなす面で、鏡肌を呈することが多い。

定圧試験、定体積試験、プレカット定圧試験、いずれの試験条件においても累積水平変位48mm(繰り返し回数2回)のときの配向度が最も高い。とくに、定圧試験(M=97.3%)とプレカット定圧試験(M=99.2%)の配向度はほぼ100%で、かつ最頻度配向方向 $\alpha_{mode}=0^\circ$ であり、ほぼ完全配向している。また、定圧試験と定体積試験における累積水平変位720mmの配向度は、水平変位6mmの配向度より低くなっている。

図-4.10に配向度とせん断応力との関係を示す。ここに示したせん断応力は、水平ロードセルにより測定されたせん断力をせん断面の面積で除した値である。

図より、定圧試験とプレカット定圧試験では、配向度が高くなるほどせん断応力が小さくなる傾向が認められ、主変位せん断面の粒子配向が残留強度と密接に関係していることを表している。また、定体積試験では配向度とせん断応力との間に明瞭な関係が認められないが、これは今回の試験中にせん断箱隙間から試料が漏れ出し、供試体の体積減少による垂直力の大幅な減少がせん断応力に反映したためである。

以上より、主変位せん断面の配向度は、定圧試験、定体積試験、プレカット定圧試験のいずれの試験条件においても累積水平変位48mm(繰り返し回数2回)のとき最も高い値を示す。とくに、定圧試験(M=97.3%)とプレカット定圧試験(M=99.2%)の配向度はほぼ100%で、かつペッドの最頻度配向方向が $\alpha_{mode}=0^\circ$ であることから、ペッドはせん断方向に完全配向している。このように、定圧試験とプレカット定圧試験において、残留状態の配向条件(主変位せん断面の完全配向)を満たしている。

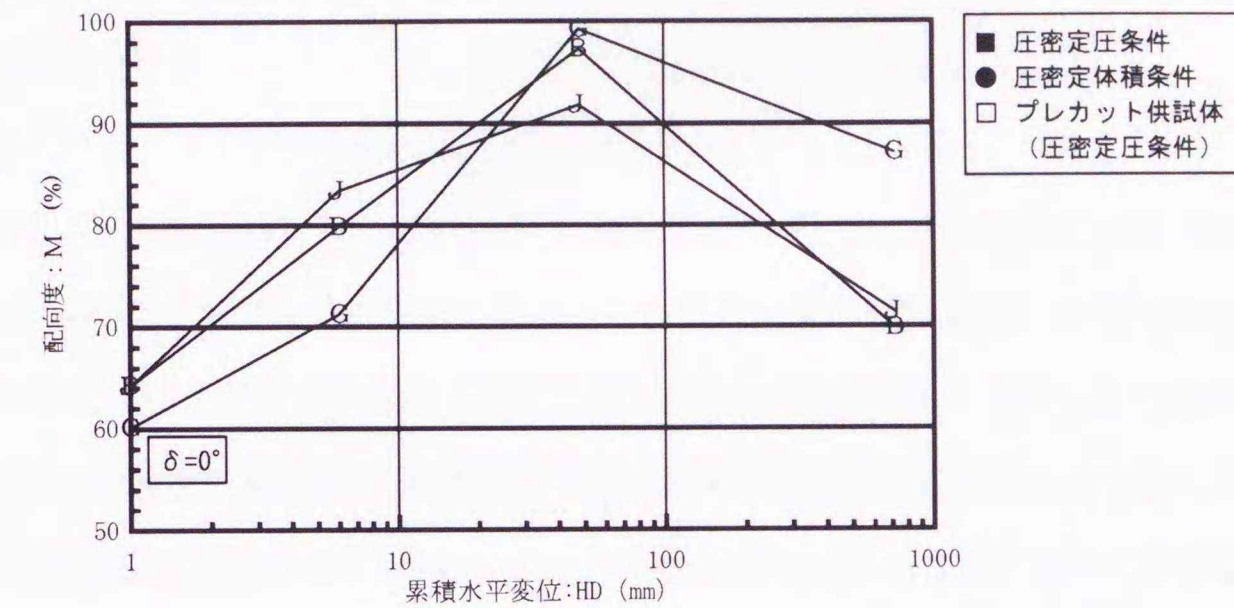


図-4.9 各試験条件における主変位せん断面の配向度：M

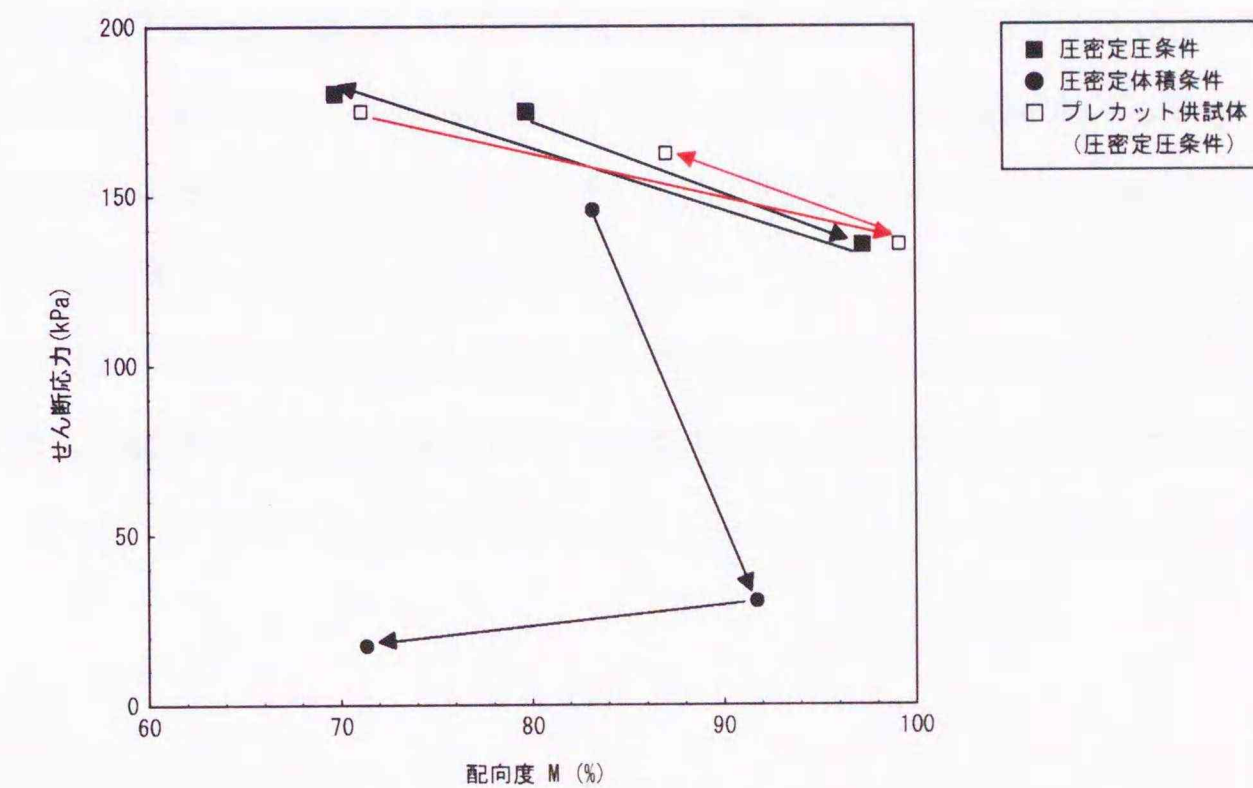


図-4.10 配向度(M)とせん断応力(τ)との関係

4.2.2 繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度の妥当性

以上の結果をもとに、繰り返し一面せん断試験より得られる残留強度の妥当性について考察する。

残留強度とは、宣保¹²⁾によると、“粘土粒子の完全配向面（通常鏡肌）において発揮される最小の排水強度”でせん断方向への粒子配向の重要性が指摘されている^{7), 13) ~ 15)}。よって、主変位せん断面の性状、とくに構成粒子の配向性がその妥当性を判断する上でポイントとなる。せん断面上における粒子配向は、実際の地すべり面においても“鏡肌”など広く認められている。

定圧試験とプレカット定圧試験における主変位せん断面は、累積水平変位48mmのとき、配向度(M)はほぼ100%で、かつペットの最頻度配向方向が $\alpha_{mode}=0^\circ$ であることから、ペットはせん断方向に完全配向している。このように、定圧試験とプレカット定圧試験により形成された主変位せん断面は、上記配向条件を満たしている。本研究ではカオリン粘土を用いているが、スメクタイトを約61wt.%含有する流紋岩質凝灰岩においても、同様の結果が得られている¹⁶⁾。一方、定体積試験では、配向度は定圧試験、プレカット定圧試験より低く、さらにせん断層内のペットが攪乱帯の様相を呈していることから、現状では定体積試験から求められる残留強度の妥当性に問題がある。また、繰り返し一面せん断試験中のせん断箱隙間からの試料漏れを防止することは出来ないから、供試体の体積減少は避けられず、事実上、定体積条件を満たすことは不可能であることから、多数回の繰り返しせん断を伴うような定体積試験は残留強度を求める目的には適さない。

このように繰り返し一面せん断試験において、比較的少ない変位で主変位せん断面の完全配向が認められ、かつせん断応力もこのとき最小値を示していることから定圧試験およびプレカット定圧試験結果から残留強度として妥当な値を得ることができる。

4.3 せん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力の影響

4.3.1 学会基準（一面せん断試験）における摩擦の取扱い

地盤工学会「土質試験の方法と解説—第1回改訂版—（土の圧密定体積一面せん断試験方法 JGS T 0560, 圧密定圧一面せん断試験方法 JGS T 561）」では、せん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力について関東ロームを用いた松尾ら¹⁷⁾の試験結果(図-4.11a, b, c)をもとに「供試体とせん断箱の接触面積はその2倍の割合で増加していくため、摩擦抵抗が土のその半分であればせん断面の面積の補正は必要ない」とし、摩擦の影響を無視している。しかし、ここで取り上げられている試験データは、「上容器内の試料が下容器の上面とに接触することによる摩擦(f_1)」のみであり、「下容器内の試料が上容器下面と接触することによる摩擦(f_2)」については測定されていない。 f_1 は、下せん断箱のかわりにこれと同じ材質（真鍮）の平板を置いて一面せん断試験を行うことで求めている。 f_2 については、「 f_1 より小さいと予想される」とし、さらに摩擦の影響を考慮した式($T=\tau A+(f_1+f_2)\Delta A$)を簡単にするために「 $\tau=f_1+f_2$ 」と仮定している。ここにTは全せん断力であり、 τ はせん断面に作用するせん断応力、Aは有効せん断面積、 ΔA はズレ面積である。つまり、実際に得られたデータは f_1 に限られており、しかも τ と f との関係を仮定することで摩擦の影響を無視できるとしているのである。また、「摩擦抵抗が土のその半分（同じ σ に対する f_1 と τ との比）」としていることについては、水平変位が小さいところ(水平変位 $dh=1mm$?)でのデータによるものであり、水平変位が大きくなった場合については触れていない。このように、学会基準における摩擦力の取扱いは、多くの仮定に基づくものであり、さらなる検討が必要と考えられる。

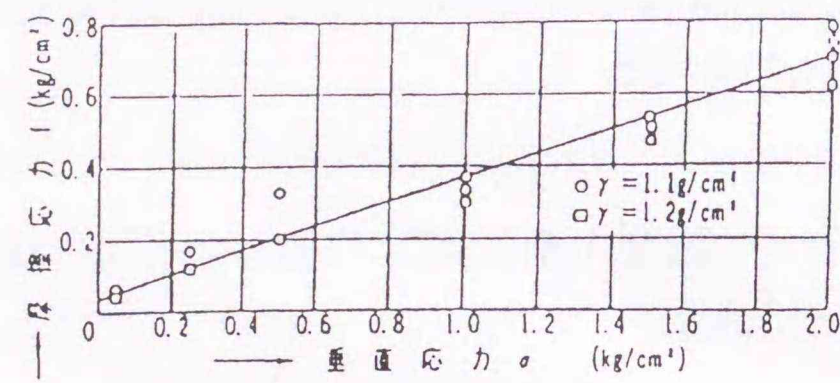


図-4.11a 一面せん断試験における摩擦応力と垂直圧力の関係

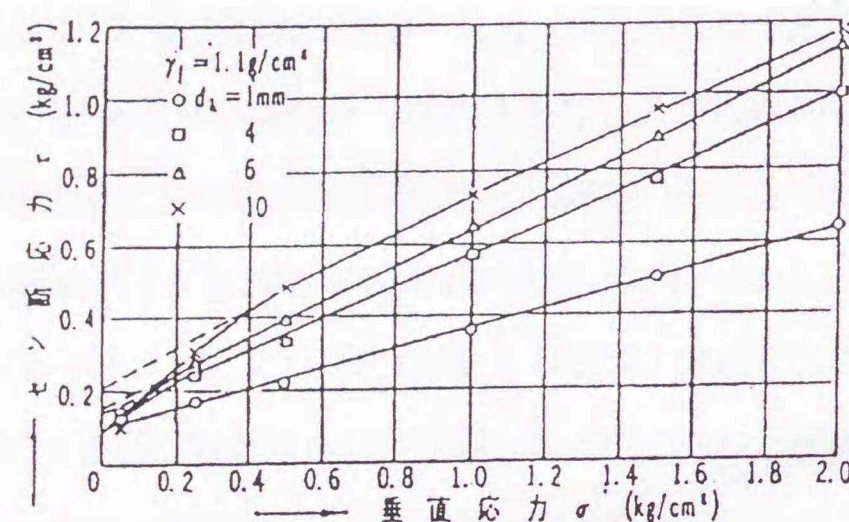


図-4.11b 種々の水平変位に対する $\tau \sim \sigma$ 関係

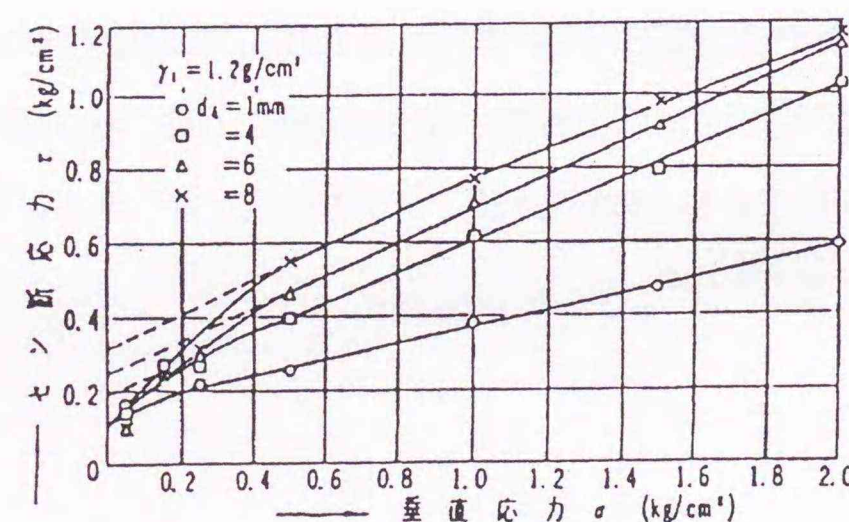


図-4.11c 種々の水平変位に対する $\tau \sim \sigma$ 関係
(垂直圧力一定せん断)

4.3.2 全せん断力に占める摩擦力の割合

圧密定圧条件および圧密定体積条件におけるせん断箱と供試体せん断面間の摩擦力(F_r)－水平変位(III)関係を図-4.12, 図-4.13に, 試料および試験条件を表-4.2に示す。

圧密定圧条件における摩擦力(F_r)は, せん断に伴い増加し, 水平変位6mm(せん断面積減少率10%)のときの全せん断力(SF)に占める摩擦力(F_r)の割合は, 上下ロードセル平均で4.89%である。なお, 全せん断力(SF)とは, 水平ロードセルにより測定された値である。

圧密定体積条件では, せん断に伴い摩擦力(F_r)は増加するものの, 定圧条件に比べ増加割合は小さい。水平変位6mm(せん断面積減少率10%)のときの全体のせん断力(SF)に占める摩擦力の割合は上下ロードセルの平均で1.69%である。

このほか, 上下ロードセルで測定された摩擦力は, 定圧条件・定体積条件ともに下ロードセルが上ロードセルより大きい値を示している。本装置は, 上部载荷型の上箱固定/下箱可動の構造となっており, せん断によりせん断箱がずれた状態では, 载荷板より加えられた垂直力が直接下せん断箱上にかかる。そのため, 垂直力は下せん断箱に伝達されやすく, 下箱にかかる垂直力が大きい分だけ摩擦力(F_r)も大きくなったものと考えられる(図-4.14)。

表-4.2 試料および試験条件

試料	試料名	NSF粘土($W_L=56\%$, $I_p=26$)
	供試体寸法	直径60mm, 高さ20mm
試験条件	試験条件	圧密定圧条件, 圧密定体積条件
	圧密圧力	300kPa
	せん断速度	0.02mm/min
	最大水平変位量	6mm
	せん断箱間隔	0.2mm

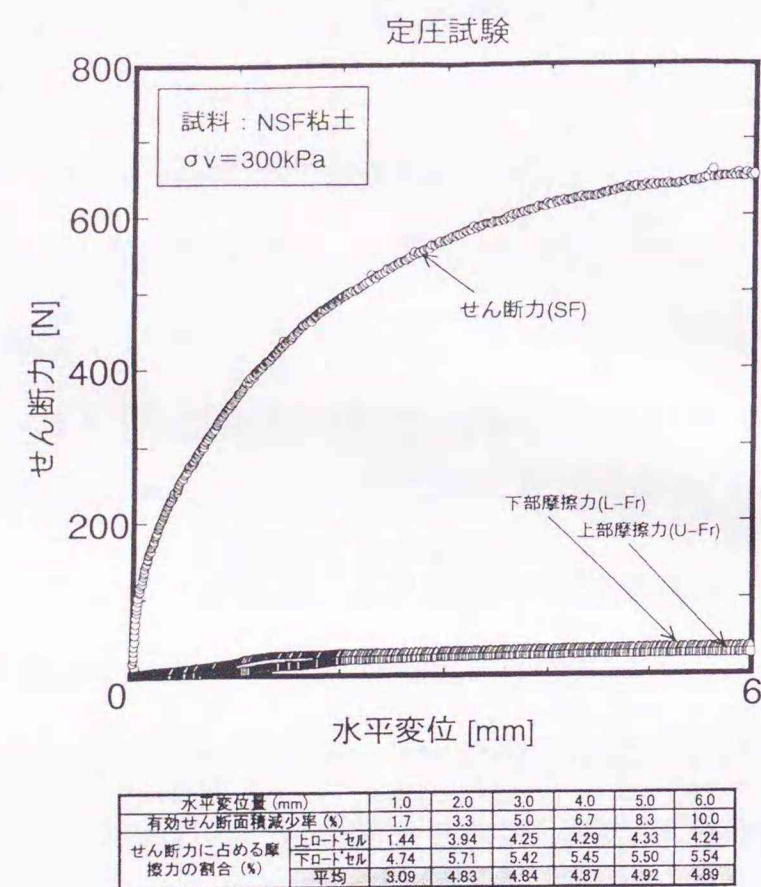


図-4.12 圧密定圧条件におけるせん断箱と供試体せん断面間の
摩擦力[Fr]—水平変位[HD]の関係

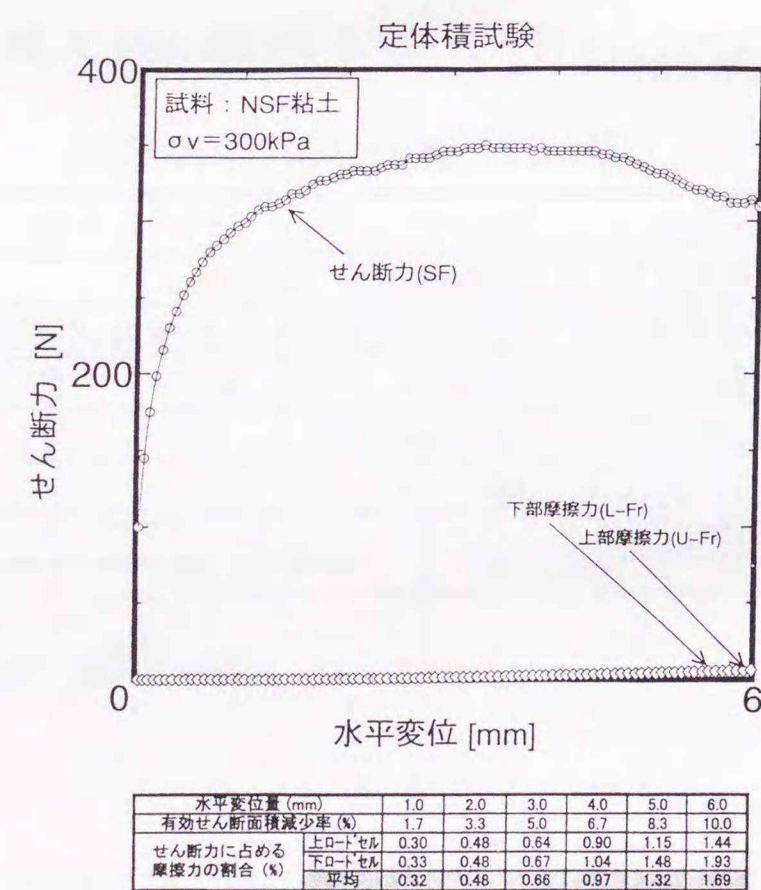


図-4.13 圧密定体積条件におけるせん断箱と供試体せん断面間の
摩擦力[Fr]—水平変位[HD]の関係

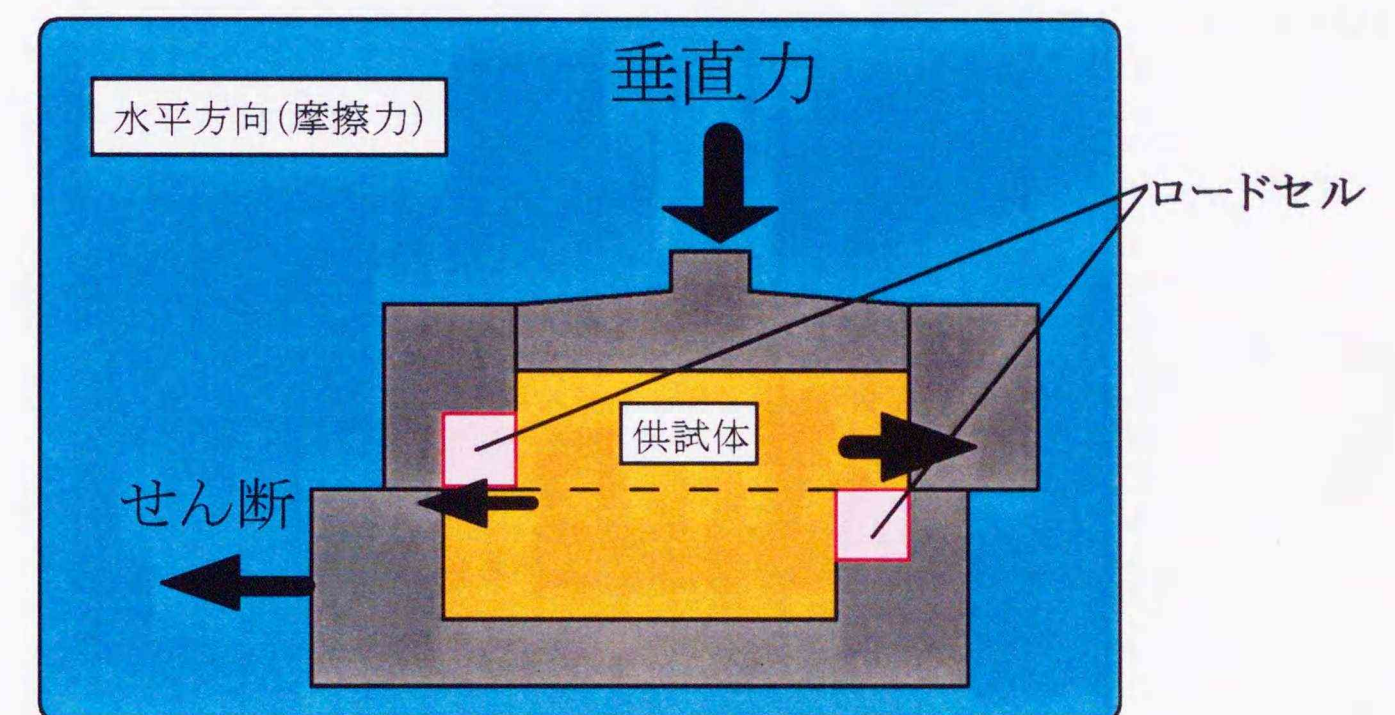
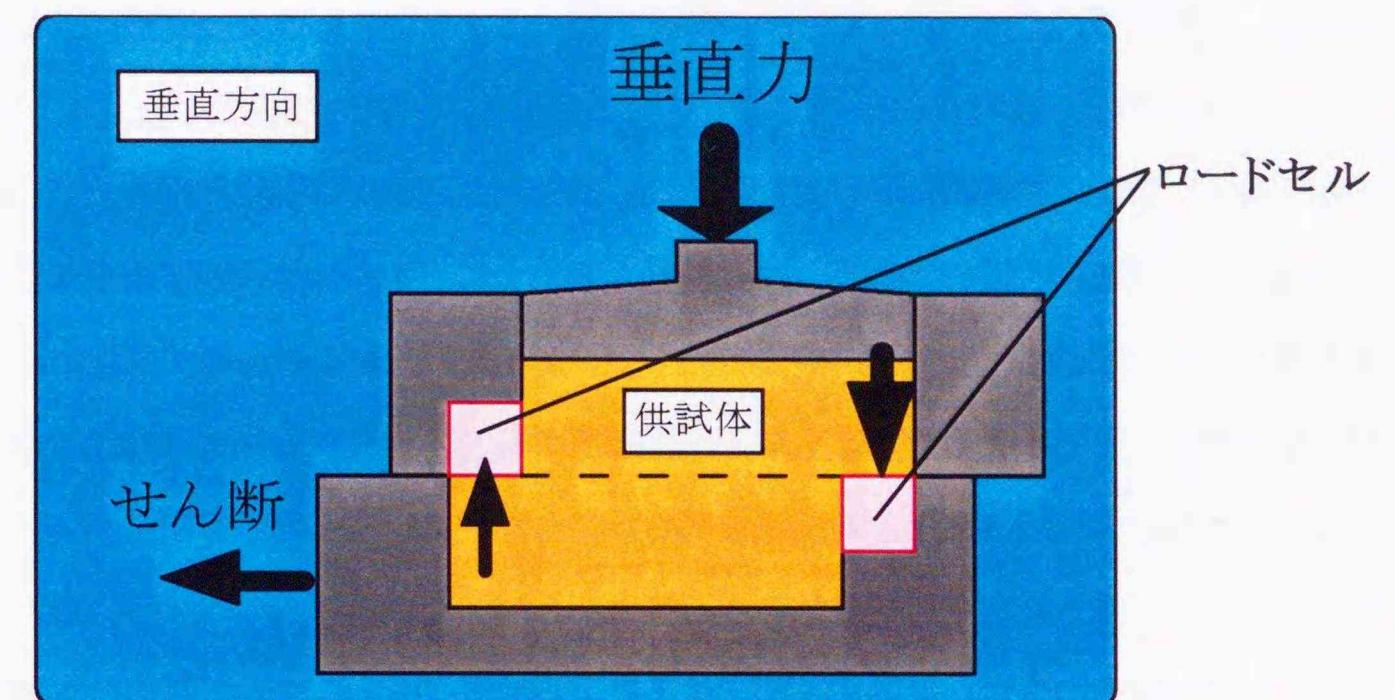


図-4.14 垂直力と上下内蔵ロードセルとの関係

4. 4 上下せん断箱隙間からの漏出試料によるせん断箱間に作用する摩擦力の影響

4. 4. 1 従来の試料漏れ対策

繰り返し一面せん断試験による試料漏出は、繰り返し回数が増加するほど、また定体積試験に比べ定圧試験において顕著である。試料漏れ対策として、せん断箱間隔を小さくする、供試体にゴムスリーブを被せる¹⁸⁾、せん断箱にテーパをつける¹⁹⁾などの対策が実施されている。しかし、せん断箱間隔を小さくするにも技術的な限度があり、そもそも様々な粒径をもつ現場試料に対して、せん断箱間隔と粒径との関係を明らかにしなければならない。またゴムスリーブによる方法は、ゴムの張力を測定して全体のせん断力から減じなければならないが、繰り返し回数の増加に伴うゴム張力の変化を試験中に測定することは容易でない。せん断箱の接触部分にテーパを付ける方法は、軟岩の不攪乱試料を対象として考えられたもので、垂直荷重によるせん断面からはみ出しが少ない固結度の高い試料には有効であるが、粘土のようにはみ出しが生じやすい試料の場合、エッジ効果が出やすい。

4. 4. 2 全せん断力に占める摩擦力の割合

試料漏れによるせん断箱間に作用する摩擦力を、せん断箱に内蔵された小型高剛性ロードセルにより測定した。試料および試験条件を表-4. 3に示す。

写真-4. 11は、繰り返しせん断試験中に上下せん断箱の隙間から試料が漏れた様子を示している。図-4. 15はこのときせん断箱内蔵のロードセルにより測定された摩擦力(F_r)および水平ロードセルで測定された全せん断力(SF)である。図より、上部、下部摩擦力ともにほぼ一定値をとっている。残留状態に至った累積水平変位96mm(繰り返し回数4回、上下せん断箱の相対変位なし)のときの全せん断力($SF=285.3N$)に占める試料漏れによる摩擦力($F_r=53.5N$)の割合は18.8%である。

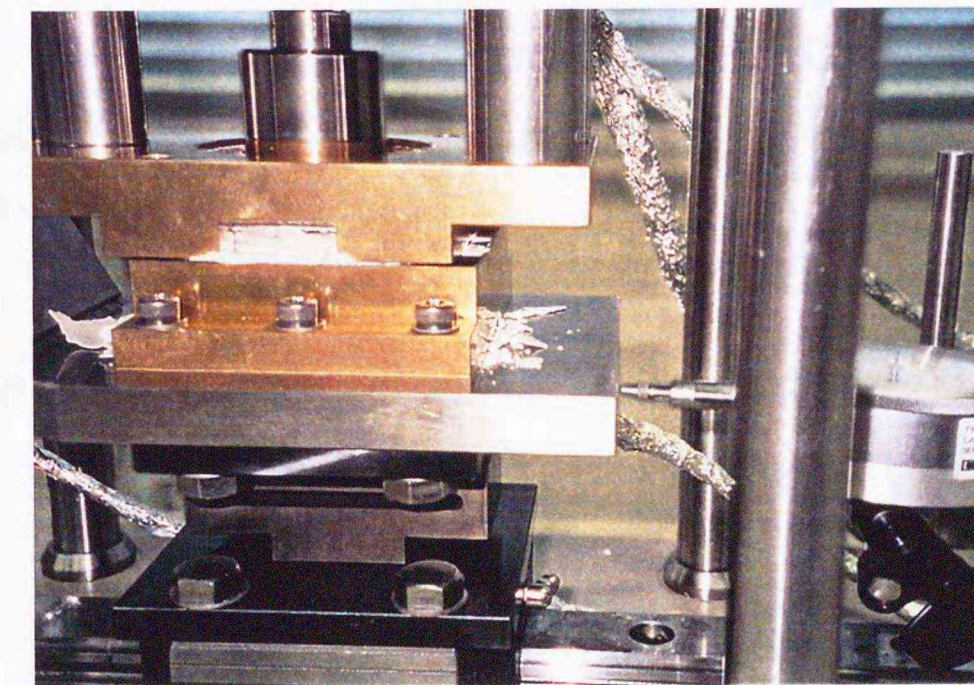


写真-4.11 上下せん断箱間からの試料漏れ

表-4.3 試料および試験条件

試料	試料名	NSF粘土 ($W_L=56\%$, $I_p=26$)
	供試体寸法	直径60mm, 高さ20mm
試験条件	試験条件	圧密定圧条件
	圧密圧力	200kPa
	せん断速度	0.2mm/min
	水平変位量	前後それぞれ6mm
	累積水平変位量	96mm(くり返し回数4回)
	せん断箱間隔	0.2mm

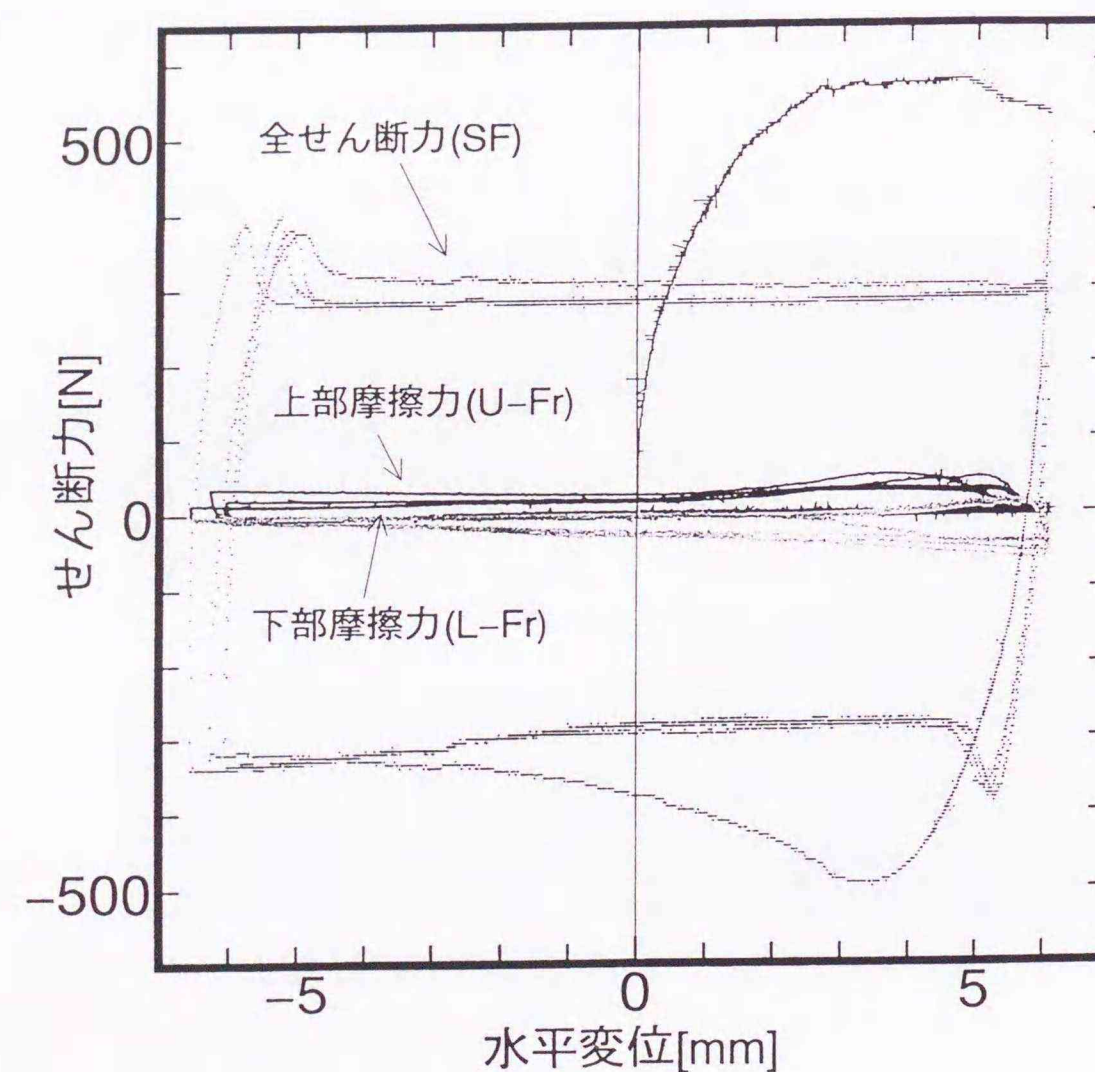


図-4.15 定圧試験におけるせん断箱間の摩擦力[Fr]-
水平変位[HD]の関係

4. 5 残留強度に及ぼすせん断速度の影響

4.5.1 せん断抵抗係数とせん断速度に関する従来の研究

粘土の残留強度がせん断速度に対して依存性を示す(対数比例, 対数反比例)ものと示さないものがあることが知られている^{7)~9), 20)~22)}。残留強度がせん断速度の影響を受けることの一要因に, せん断面上の有効垂直応力の変化をもたらす間隙水圧の存在が指摘されている。矢田部ら²¹⁾は, リングせん断試験において, せん断面付近の間隙水圧を測定し, せん断変位速度が大きいほど間隙水圧が大きくなると述べている。中村ら²²⁾は, 地すべり面粘土を用いたリングせん断試験より, 異なるせん断速度においてもせん断時間の経過とともに残留強度は一定値に近づき, せん断速度が遅いもののほど少ない変位量で一定値に近い値が得られることから, これを間隙水圧の消散によるものとし, 間隙水圧の問題を大きく取り上げている。一方で鈴木⁷⁾は, カオリン粘土を用いたリングせん断試験において, 排水条件が近似的に成立している(せん断面上の間隙水圧がほとんど発生していない)せん断速度の範囲で, 残留強度が対数表示のせん断変位角速度の増加に対してほぼ直線的に増加しているため, せん断速度の影響を間隙水圧の問題に帰着させることに疑問をなげかけている。そもそも残留状態とは, せん断に伴う粒子配向が終了し, せん断面の体積変化 $\Delta V \cong 0$ となった状態をさすため, 間隙水圧の変化があるうちは間隙比一定という残留条件を満たしていない。

また, 鈴木⁷⁾はこれまでに報告された繰り返し一面せん断試験およびリングせん断試験によるせん断速度と残留強度との関係を整理し, 種々の土の残留強度はせん断速度の増加に対して増加, 不変, 減少するものがあり, 異なるせん断速度で行われたリングせん断試験結果では, ここに示したデータに限ればとした上で, 残留強度は I_p の小さい土がせん断変位速度の増加に対して増加するようであると述べている。このことは, 残留強度がせん断速度の影響を受けることの一要因に, 粘土の物性が関係していることを示唆するものである。ここで示された残留強度は, すべて τ_r / σ_N として整理されたものであり, ゆえに残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ とせん断速度との関係を表していることに注意しなければならない。

4.5.2 ストライベック曲線とせん断速度

粘土の物性が残留強度の発現機構に深く関与していることは第3章で既に論じた。したがって、残留強度に及ぼすせん断速度の影響を考えるにあたっては、残留強度の発現機構すなわち固体表面間の摩擦現象について理解することが重要である。

固体表面間の摩擦特性は、その潤滑状態に応じて大きく変化することが分かっており、トライボロジーでは、これら潤滑状態を縦軸に摩擦係数 μ を横軸にゾンマーフェルト数(粘度 $\eta \times$ 相対速度 V /荷重 P)をとったストライベック曲線により「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境界潤滑」の3領域に区分している。粘土の残留状態を想定した場合、せん断面での潤滑状態は水を流体膜とした流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑のいずれかの状態にあると考えられ、よって発揮されている残留強度も「流体摩擦」、「混合摩擦」、「境界摩擦」に類似すると推定される。

「流体潤滑」とは、二つの固体表面が流体膜で完全に分離されている状態で、摩擦は、流体膜の粘性または粘弾性に起因する。ここでは摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に比例する。すなわち、粘度 η と速度 V に比例し、荷重 P に反比例する。

「混合潤滑」は、「流体潤滑」と「境界潤滑」が混在している状態で、摩擦は流体膜と境界潤滑膜(半固体～半液体的挙動)の2つの働きにより生じ、摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に反比例する。

「境界摩擦」は、流体膜の厚さが数分子層以下と非常に薄くなった状態で、粒子表面の凸部では部分的に固体接触も起きている。摩擦係数 μ はゾンマーフェルト数に依存しない。

このように、摩擦形態はそれぞれの固体表面間の状態、すなわちその厚さに応じて3領域に区分される。

ストライベックは、軸受けの摩擦実験から摩擦係数とゾンマーフェルト数との関係を見い出したが、第3章3節で論じたように摩擦係数 μ は粘土の残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ に相当するため、ここで示された関係はせん断速度と $\tan \phi_r$ との関係を示しているとも考えられる。すなわち、横軸のゾンマーフェルト数は、それぞれ相対速度 V がせん断変位速度(V_h)に、流体膜の粘度(η)が吸着水の粘度(η_w)に、荷重 P が垂直応力(σ_v)に相当する。したがって、ストライベック曲線は、残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ がせん断速度(V_h)、間隙水の粘度(η_w)、垂直応力(σ_v)の関数として表されること、その関係は3つの領域に区分できることを示している。ここでせん断速度(V_h)に着目すると、「流体潤滑」はせん断速度に対して $\tan \phi_r$ が比例する領域であり、「混合潤滑」は反比例する領域、「境界摩擦」はせん断速度に依存しない領域となる。

図-4.16は、既存データに示された残留状態におけるせん断抵抗係数($\tan \phi_r$)とせん断速度 V_h との関係を試料名とともにプロットしたものである。相沼内地すべり粘土とNSF粘土のデータは、繰り返し一面せん断試験(相沼内粘土: $\sigma_v=400\text{kPa}$, NSF粘土: $\sigma_v=305\text{kPa}$)より得られたもので、猿供養寺地すべり粘土はリングせん断試験($\sigma_v=56\text{kPa}$)によるものである。それぞれ、せん断抵抗係数($\tan \phi_r$)がせん断速度に対数比例するもの(相沼内地すべり粘土)、対数反比例するもの(猿供養寺地すべり面粘土)、依存しないもの(NSF粘土)、とに分けられる。

比例関係を示す相沼内地すべり粘土は、各種分析結果からその主成分がスメクタイト(含有割合: $W_c > 90\%$ 、陽イオン交換容量: $\text{CEC}=114.0\text{meq}/100\text{g}$ 、交換性陽イオン組成: $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} > 95\%$)で、僅かに石英が含まれている。スメクタイトは卓越した陽イオン交換容量(負電荷)を有し、電荷を中和するために多量の吸着水を周囲にまた層間には層間水を有している。このように、粒子間は厚い吸着水層により固体同士は接触することなく分離した状態で、摩擦は、この吸着水(流体膜)の物性(粘性)に起因しているとみられる。

反比例関係を示す猿供養寺地すべり面粘土は、モンモリロナイトを主成分とし、ハロイサイトを副成分鉱物として含んでいる。モンモリロナイトは、前述のスメクタイトの一種で $\text{CEC}=60\sim 100\text{meq}/100\text{g}$ と負電荷が卓越しており厚い吸着水層を有している。一方、ハロイサイトはカオリン鉱物の層間に1枚の水分子層がはさまれた鉱物で、層間に働く結合力は弱く層間の水分子は脱水しやすい。陽イオン交換容量 $\text{CEC}=5\sim 40\text{meq}/100\text{g}^{(23)}$ であり、層間はスメクタイトより狭く吸着水層の分布も少なくなっている。

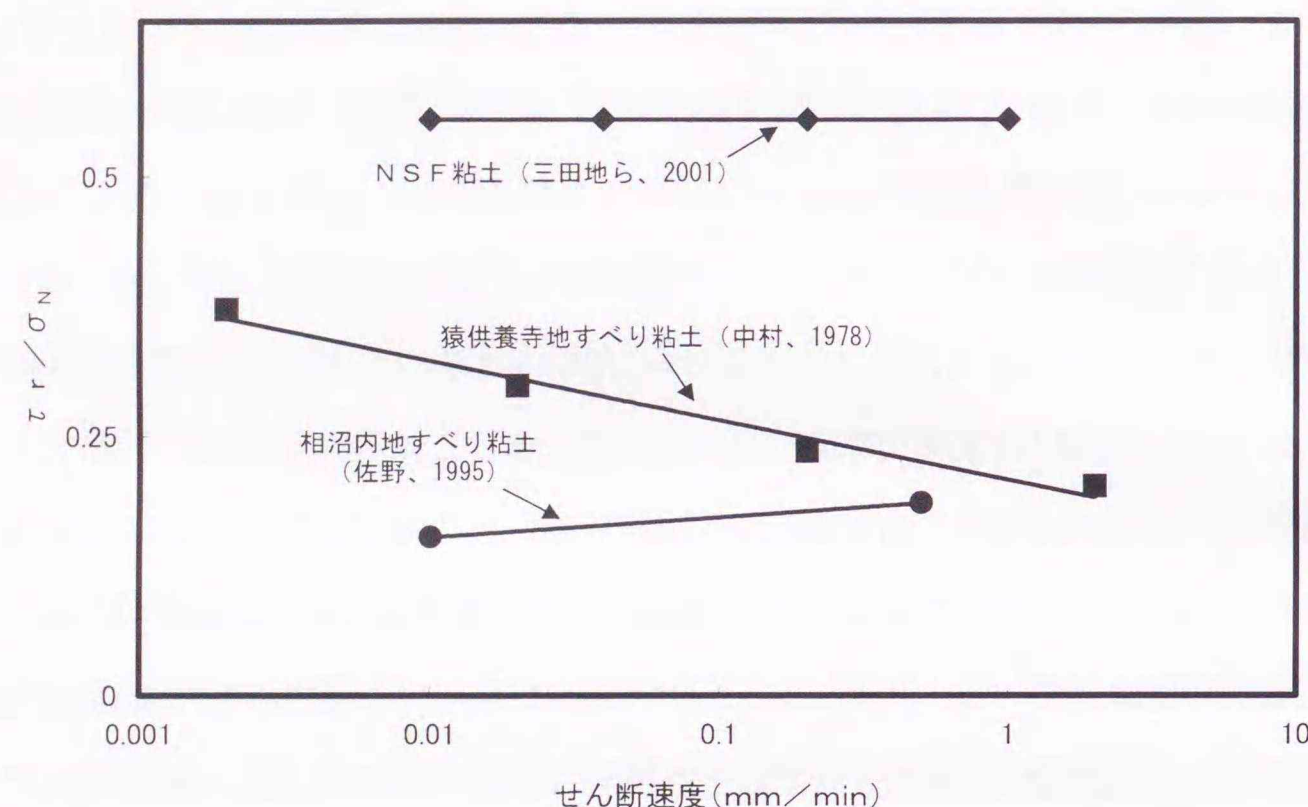


図-4.16 $\tau_r/\sigma_N - V$ の関係図

せん断速度依存性を示さないNSF粘土は、各種分析結果からパイロフィライトと石英(Wc≒43%)を主成分とし、微量のイライト、カオリン鉱物(Wc<3%)、から構成されている。主成分鉱物のパイロフィライトと石英は、電荷がないため水を吸着する力はほとんどない。よって、その周囲には厚い吸着水層を形成することができず粒子間は薄くなっていると推定される。

以上より、粒子表面間の厚さは、相沼内地すべり粘土>猿供養寺地すべり面粘土>NSF粘土となり、それぞれせん断抵抗係数($\tan \phi r'$)はせん断速度に、対数比例、対数反比例、依存しないとなる。これら固体表面間の厚さと、せん断抵抗係数($\tan \phi r'$)-せん断速度(V_h)との関係は、ストライバック曲線と傾向が同じであり、残留状態における粘土粒子表面間の摩擦現象にストライバック曲線の適用が可能と考える。よって、せん断抵抗係数($\tan \phi r'$)がせん断速度に影響を受けることの一因に、せん断面間の状態とそれに起因した粘土-水相互作用が考えられる。

4. 6 本章のまとめ

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の影響、上下せん断箱隙間からの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検証した。さらに試験の種類に関係なく残留強度に関わる影響要因としてせん断速度を取り上げ、両者の関係をトライボロジーに基づき説明した。得られた結論は以下のである。

- (1) 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観察から、主変位せん断面の配向度が、定圧試験とプレカット定圧試験においてほぼ100%であり、かつペッドの最頻度配向方向が $\alpha_{mode}=0^\circ$ であることから、ペッドはせん断方向に完全配向している。
- (2) せん断面の厚さは、定体積試験>定圧試験>プレカット定圧試験の順で、定体積試験では、せん断変位の増加に伴いせん断層の厚さが著しく増加するのに対し、プレカット定圧試験では、せん断変位に関係なくほぼ一定である。
- (3) 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、有効せん断面積減少率10%のときの全せん断力に占める摩擦力の割合が定圧条件で4.9%、定体積条件で1.7%であり、実用上無視できる範囲にある。
- (4) 試料漏れによる摩擦力の影響に関して、全せん断力に占める漏れ摩擦力の割合が圧密定圧条件で18.8%と大きく、何らかの試料漏れ対策を講じるかあるいは測定値に適切な補正を施すことが必要である。
- (5) (1), (2), (3), (4)より、試料漏れ対策を施した圧密定圧条件とプレカット供試体を用いた圧密定圧条件に基づいて実施された繰り返し一面せん断試験結果から残留強度として妥当な値を得ることが出来る。
- (6) 残留強度がせん断速度の影響を受けることに関して、ストライバ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、せん断抵抗係数($\tan \phi r$)がせん断速度に対して増加、不変、減少することを説明できる。

＜参考文献＞

- 1) Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A. and Brown, J. D. : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength Geotechnique, Vol. 21, pp. 273~328, 1971.
- 2) 宜保清一：残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度，地すべり，Vol. 31, No. 3, pp. 24~30, 1994.
- 3) 矢田部龍一・八木則男・向谷光彦・榎明潔：土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響，土木学会論文集，No. 554 / III-37, pp. 139~146, 1996.
- 4) Nakamori, K., Yang, P. and Sokobiki, H. : Strength Characteristics of Undisturbed landslide Clays in Tertiary Mudstone, Soils and Foundations, Vol. 36, No. 3, pp. 75~83, 1996.
- 5) Gibo, S., Egashira, A. E. and Ohtsubo, M. : Residual Strength of Smectite-dominated Soils from the Kamenose Landslide in Japan, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 671~674, 1987.
- 6) 岸本良次郎・向井田善朗・佐藤健司：土の剪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, 1997.
- 7) 鈴木素之：リングせん断試験による土の残留強度に関する基礎的研究，信州大学博士論文，1998.
- 8) Lupini, J. F., Skinner, A. E. and Vaughan, P. R. : The drained residual strength of cohesive soils, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 181~213, 1981.
- 9) Lemos, L., Skempton, A. W. and Vaughan, P. R. : Earthquake loading of shear surface in slopes, Proc. 11th I. C. S. M. F. E., Vol. 4, pp. 1955~1958, 1985.
- 10) 松尾新一郎・嘉門雅史：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, 1976.
- 11) 松尾新一郎・嘉門雅史：粘性土の構造の表示法に関する考察，第8回土質工学研究発表会，pp. 93~96, 1973.
- 12) 宜保清一・江頭和彦・林義隆：地すべり土の残留強度の大変位剪断試験による測定法と物理的鉱物学的性質による類推法，農業土木学会論文集，第159号，pp. 57~63, 1992.
- 13) Skempton, A. W. : Long-term stability of clay slopes, Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 77

~102, 1964.

- 14) Skempton, A. W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3~18, 1985.
- 15) 宣保清一・仲村哲・江頭和彦・大坪政美：北松型地すべりにおけるすべり面上の残留強さ，自然災害科学研究西部地区部会報，第3号，pp. 11~19, 1992.
- 16) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗・多田元彦・佐野彰：繰返し一面せん断試験後の粘土および軟岩のせん断面のSEM観察，土木学会第50回年次学術講演会，III-192, pp. 384~385, 1995.
- 17) 松尾稔・軽部大蔵：室内せん断試験結果の設計への適用に際する2，3の問題点，第11回土質工学シンポジウム，土質工学会，pp. 91~100, 1966.
- 18) 鈴木祥一・小川正二・和田正・アリ，K.：繰返し一面せん断試験で求めた土の残留強さ，第32回地すべり学会研究発表講演集，pp. 327~328, 1993.
- 19) 佐野彰・三田地利之・澁谷啓：地すべり面強度定数決定のための軟岩用自動繰返し一面せん断試験機の開発，地すべり，第31巻，第2号，pp. 41~45, 1994.
- 20) Skempton, A. W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3~18, 1985.
- 21) 矢田部龍一・八木則男・榎明潔：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性，土木学会論文集，No. 436/III-16, pp. 93~101, 1991.
- 22) 中村浩之・清水清文：すべり面におけるせん断強度決定のための土質試験法，地すべり，Vol. 15, No. 2, pp. 25~32, 1978.
- 23) 白水晴雄：粘土鉱物学，朝倉書店，1993.
- 24) 佐野彰：地すべり安定解析用強度パラメータの決定方法に関する研究，北海道大学博士論文，1995.
- 25) 三田地利之・九田敬行・石橋正弘：繰返し一面せん断試験による残留強度とせん断速度の関係，地盤工学会北海道支部技術報告集，第41号，2001.（発表予定）

第5章 地すべり解析用小型自動繰り返し 一面せん断試験装置の開発と試験 結果の適用

5. 1 概 説

第4章では、繰り返し一面せん断試験において、せん断方向の逆転の影響とせん断箱と供試体せん断面間に作用する摩擦力が無視できる程度であることを述べた。一方で、NSF粘土を用いた定圧条件での繰り返し一面せん断試験から、残留状態における試料漏れによる摩擦力が、全せん断力の実に約20%を占めるなど試料漏れがせん断力に与える影響は無視できないことが明らかになった。試料漏れは、繰り返し回数が増加するほど、また定体積試験に比べ定圧試験において顕著である。根本的な対策としては、せん断箱間隔を小さくして試料漏れを防ぐことが考えられるが、繰り返し一面せん断試験が主に対象とする地すべり試料は、様々な粒径をもつために粒径とせん断箱間隔との関係を明らかにしなければならない。このように試料漏れ対策は、せん断箱間隔を小さくするだけでは不十分で、他の対策との併用が不可欠である。具体的には、せん断箱と試料との間の摩擦を軽減する工夫をしたり、摩擦力を測定して全せん断力から差し引く、などの対策が有効と考える。ちなみに、残留強度の測定は、上下せん断箱の相対変位がゼロとなった時点で行っているため、水平ロードセルで測定された全せん断力から、試料漏れによる摩擦力を差し引くことで真の残留強度が得られる。

次に、繰り返し一面せん断試験方法の最適化にあたり、試験条件ごとの課題を述べる。繰り返し

一面せん断試験は、通常の一面せん断試験と同様、圧密定圧条件と圧密定体積条件の2つの条件により実施されている。

圧密定圧条件での繰り返し一面せん断試験は、前述の試料漏れ対策を施すことで試験が可能であるが、地すべり試料は様々な粒径をもつため、粒径とせん断箱間隔との関係を明らかにする必要がある。

圧密定体積条件は、現状ではせん断箱隙間からの試料漏れ防止が困難なことから、事実上定体積条件を満たすことは出来ないため新たな試験方法を検討しなければならない。一例として、含すべり面試料を用いた試験を行う、残留状態に至るまでは定圧条件で試験を行いその後載荷板を固定することで疑似的な定体積条件とする、などが考えられる。含すべり面試料の試験^{1)・2)}とは、地すべり地より採取された試料中のすべり面をせん断箱のせん断面に一致させて行う方法である。この方法は、すでに大変位を経験したすべり面を利用するため、少ない変位量で残留強度が得られ試料漏れが少ない。今後、集水井などから試料を採取する機会が増え、供試体のセッティング方法をさらに工夫することで、地すべり安定解析に特有の土質試験方法として位置づけられるものと考ええる。

以上述べたような課題も含めて地すべり安定解析用の繰り返し一面せん断試験機が具備すべき条件は以下のようである。

- ① ピーク強度、完全軟化強度、残留強度を求めることができること
- ② せん断箱からの試料漏れ対策を施していること
- ③ 含すべり面試料の試験が実施できること
- ④ 広範囲なせん断速度を選択できること
- ⑤ 試料の粒径に応じたせん断箱間隔の設定ができること
- ⑥ 試験機が小型・軽量であること
- ⑦ 計測／制御の自動化が図られていること

5. 2 小型自動繰り返し一面せん断試験装置の特徴

本研究では、繰り返し一面せん断試験機が具備すべき条件を備えた「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」を開発した^{3)・4)}。装置全体を写真-5. 1に、装置構成を図-5. 1に示す。本装置は、試験機本体とパーソナルコンピュータならびにコントロールボックスから構成され、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。試験装置の主な特徴は、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により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。

試験装置の概要を以下に述べる。

せん断箱

せん断箱は、角形(6cm×6cm)と丸形(直径6cm)の2種類の供試体断面形状での試験が可能である。

角形せん断箱には、上下せん断箱の4箇所小型の高剛性ロードセルが内蔵されている(写真-5. 2)。これによりせん断箱が相対変位しているときのせん断箱と供試体せん断面間の摩擦力と試料漏れによる摩擦力とを測定することができる(図-5. 2a, b)。

丸形せん断箱には、せん断箱と供試体せん断面間の摩擦を軽減するために、せん断面部分にテフロン加工が施されているほか(写真-5. 3)、含すべり面試料の試験を実施するために、真弓ら⁵⁾を参考にすべり面とせん断箱のせん断面を一致できるようせん断箱側面をアクリルを用いて可視化し、せん断箱底盤を上下に移動できる構造にしている(写真-5. 4、図-5. 3)。

せん断箱間隔は、角形、丸形せん断箱ともに上せん断箱と固定板との間にギャップスペーサーを挟むことで、0. 01mm, 0. 2mm, 0. 5mm, 1. 0mmに調整できる。

垂直力載荷システム

本装置では、垂直力載荷システムに変位制御方式（高精度デジタルサーボモーター）を採用している。従来の装置は、応力制御方式が一般的であるが、変位制御方式の利点として、簡単に載荷板を固定できるので定体積条件の設定が簡便、試験開始時の供試体と垂直荷重載荷板との密着に熟練

が不要、ロッドの回転数から変位量を求めているので垂直変位測定用の変位計が不要、などが上げられる。ちなみに、デジタルサーボモーターの位置決め分解能は $8.79 \times 10^{-4} (^{\circ})$ で、本試験装置の垂直変位量制御分解能は計算上 $1.525 \times 10^{-7} (\text{mm})$ である(写真-5.5)。

せん断力制御システム

せん断力は、可変モーターによりロッドを介してせん断箱へ伝達される。本装置では、大変位を与えるために前後へ連続した繰り返しせん断を可能にしている。可変モーターは、パーソナルコンピュータにより変位量と回転方向が制御され、せん断時の水平変位量と繰り返し回数が設定できる。

垂直力とせん断力の測定

垂直力とせん断力の測定には、平板型の高剛性ロードセルを用いている。高剛性ロードセルは、通常の測定範囲(0~300kgf)において変位量が $10 \mu\text{m}$ と極めて小さいため⁶⁾、試験時の下せん断箱の移動が極めて少なく定体積条件を満たすことができる。

垂直力は、下せん断箱を垂直ロードセルの上に直接取り付けすることで他の部分から独立させているため、せん断箱内の周面摩擦の影響を受けることなく測定できる⁶⁾。

せん断力は、水平ロードセルにより測定されたせん断力から、前述のせん断箱内蔵ロードセルにより測定された摩擦力を減じることで求めている。これにより、ピーク強度と完全軟化強度は測定されたせん断力からせん断箱と供試体せん断面間の摩擦力を減じた値となり、残留強度は同じく試料漏れ部分の摩擦力を減じた値になっている。



写真-5.1 小型自動繰り返しせん断試験装置

試験機本体の寸法と重量

横 120cm, 奥行き 45cm, 高さ 80cm
重量 80kgf

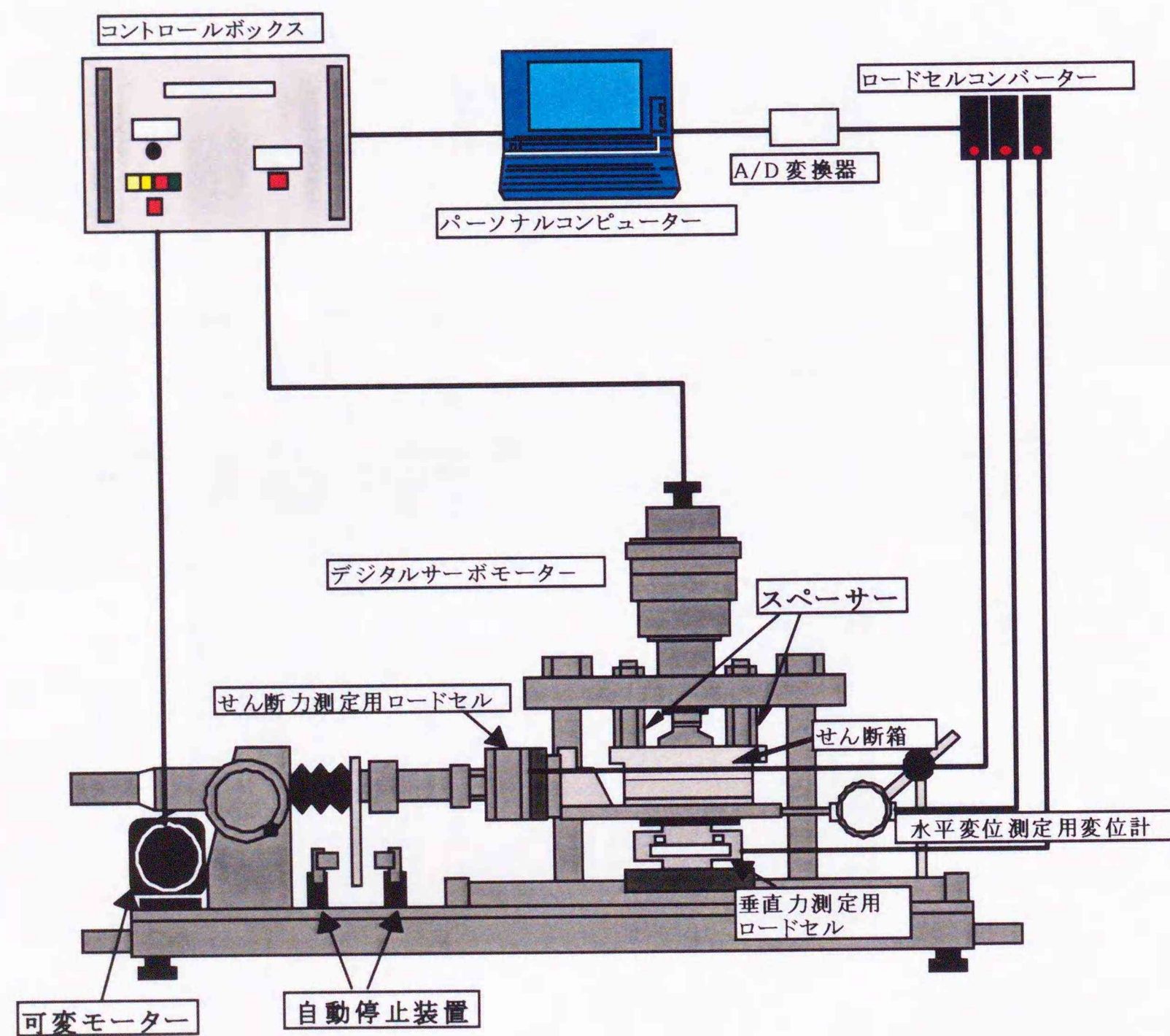


図-5.1 装置の構成図

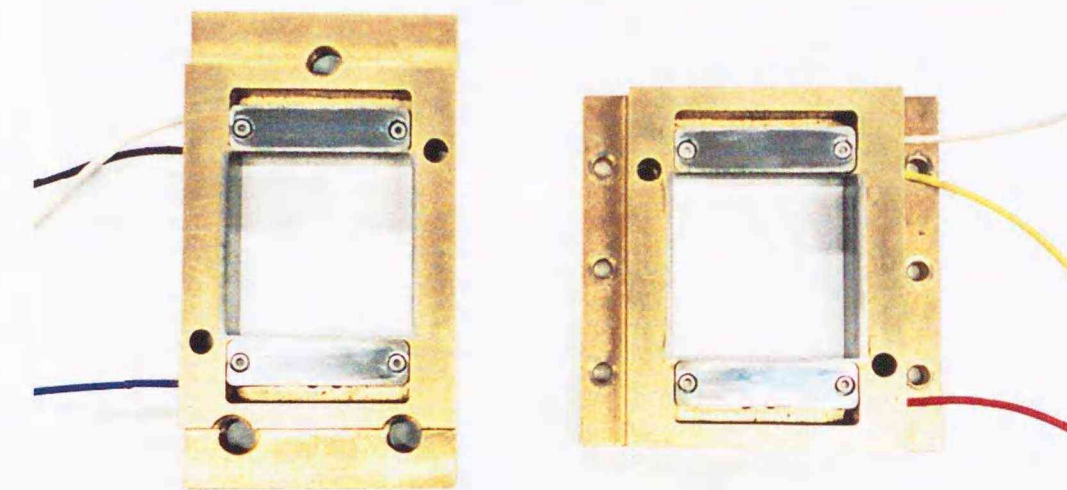


写真-5.2 セン断箱内臓小型高剛性ロードセル (角型せん断箱)

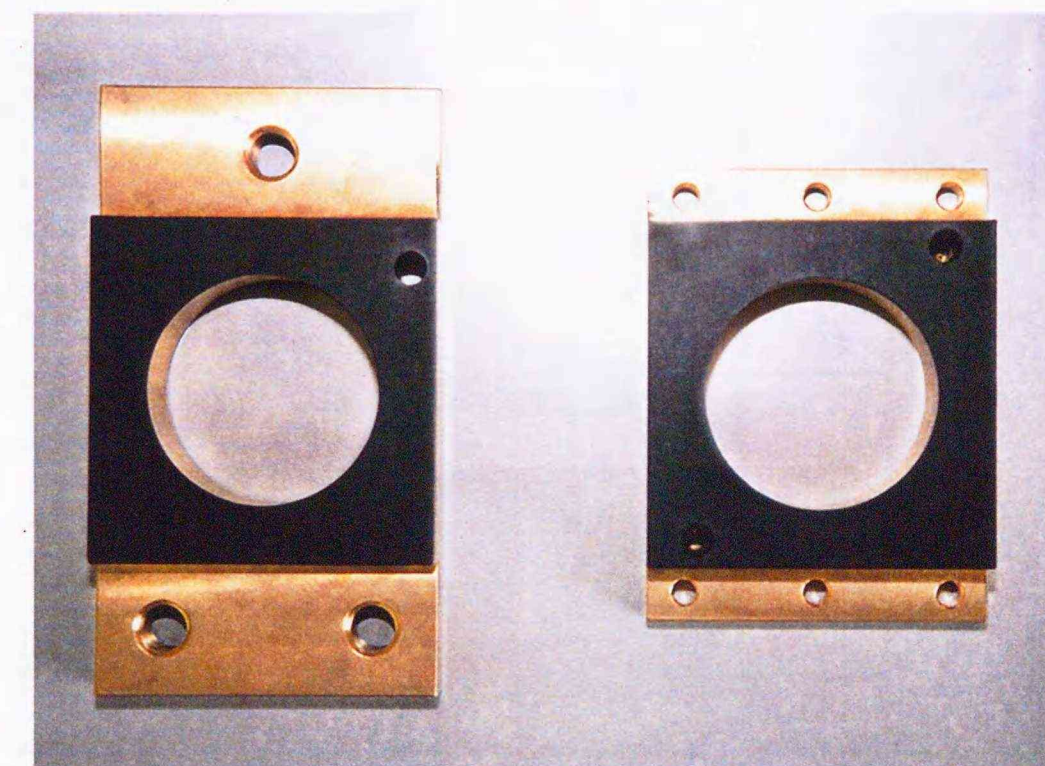
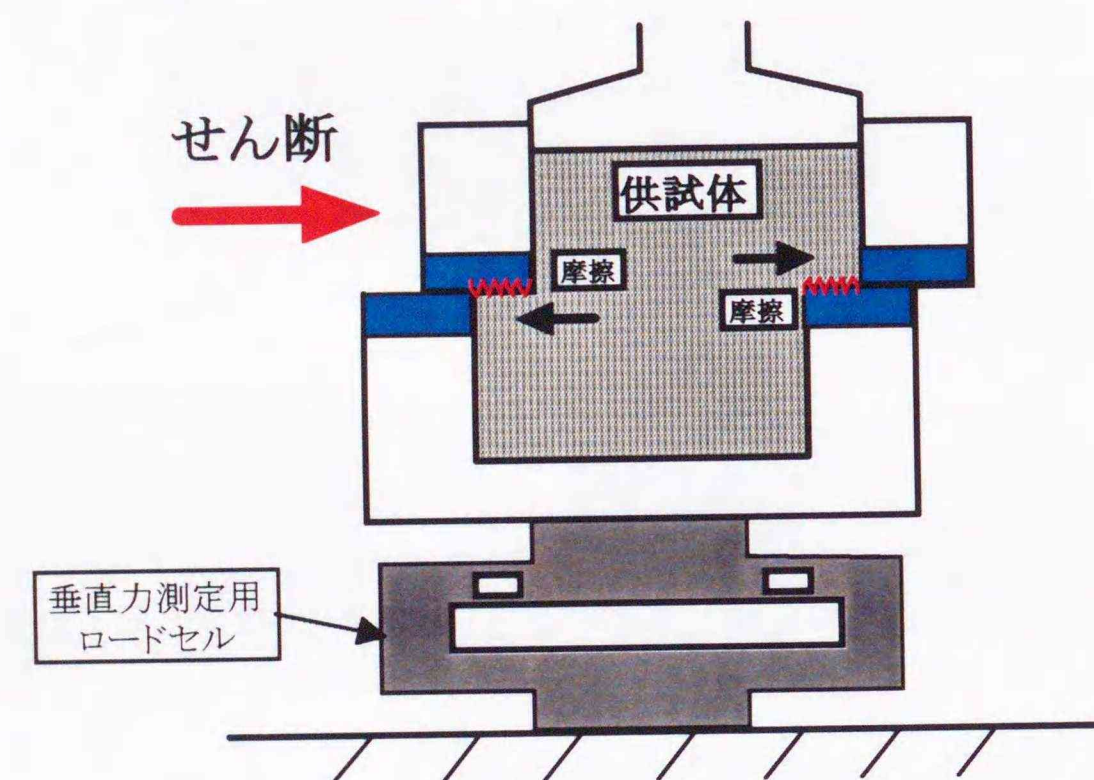
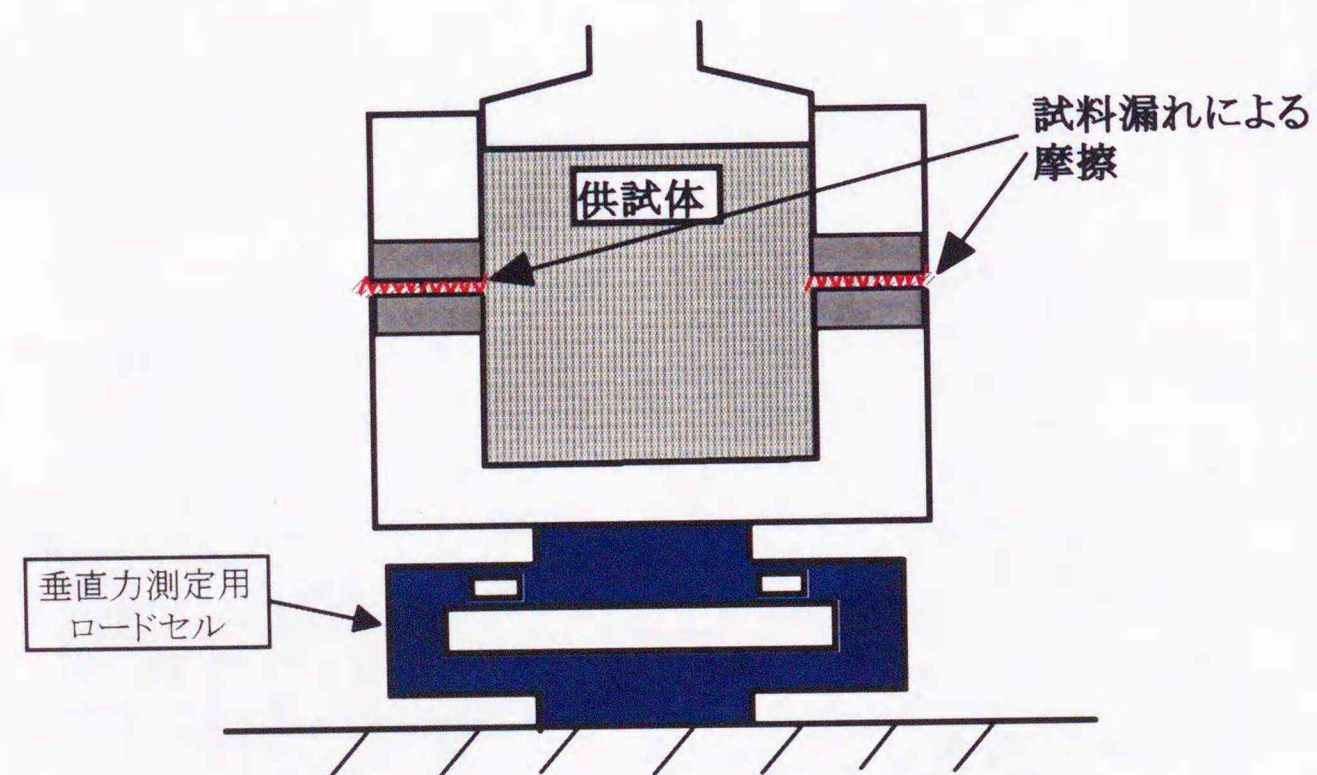


写真-5.3 セン断面部分にテフロン加工が施された丸型せん断箱

■ 小型高剛性ロードセル



a. せん断箱と供試体せん断面間の摩擦力測定



b. 試料漏れによる摩擦力測定

図-5.2 せん断箱間に作用する摩擦力の測定

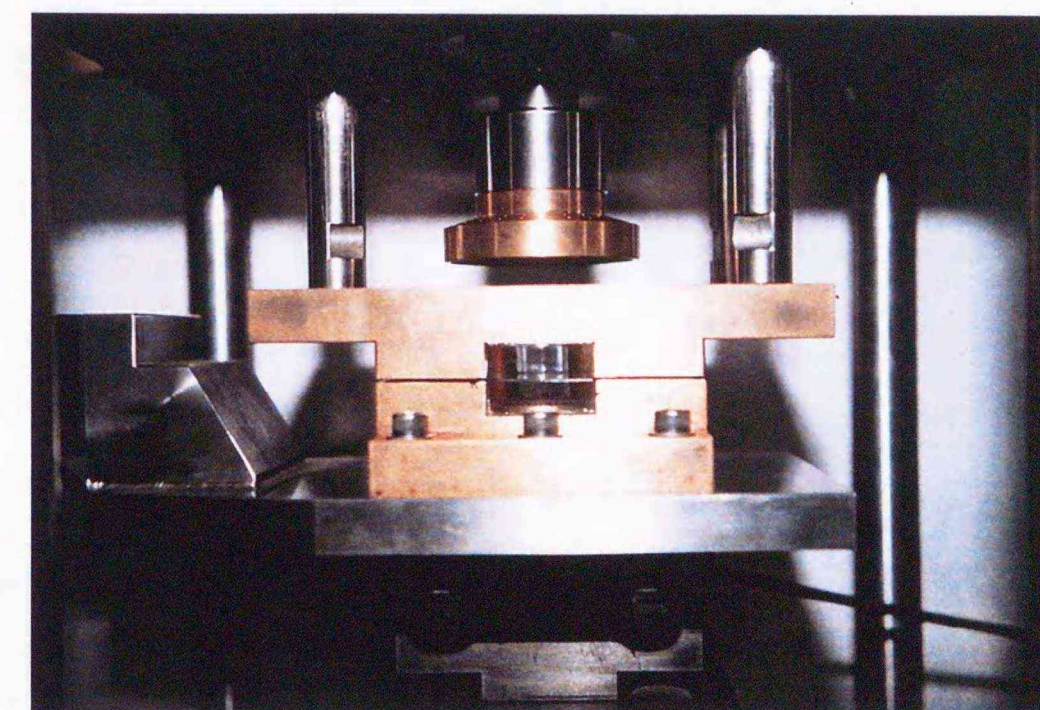


写真-5.4 アクリルによるせん断箱側面の可視化

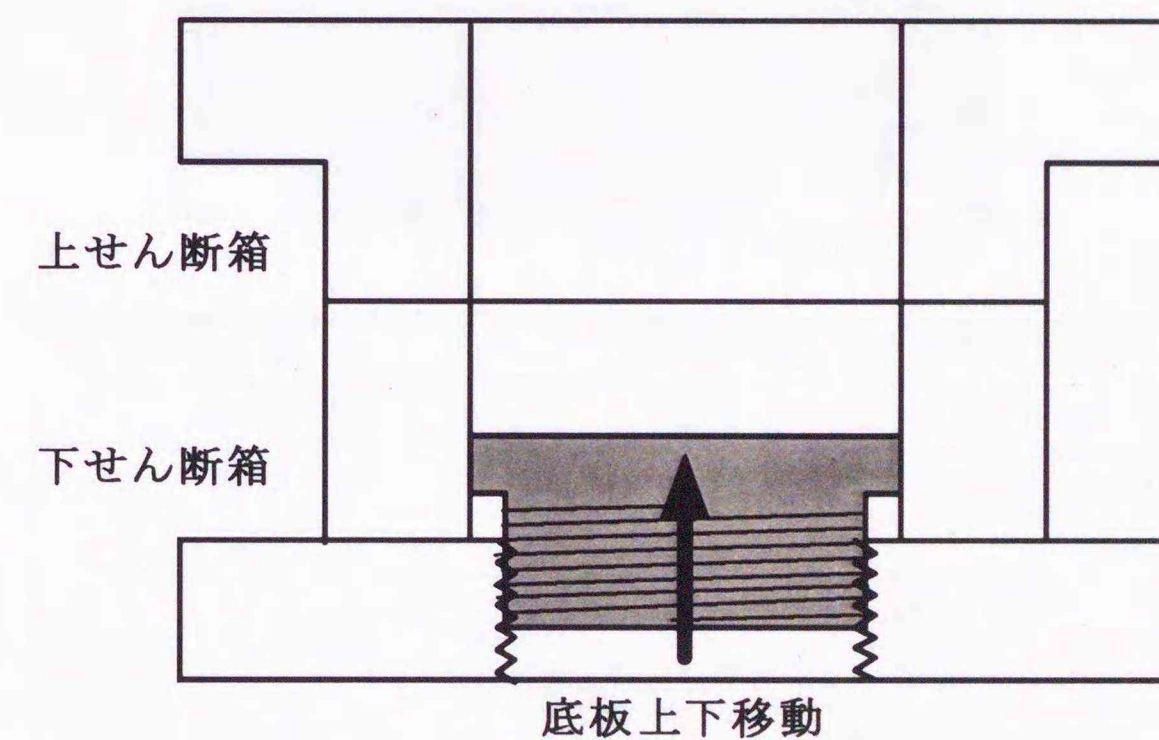


図-5.3 丸形せん断箱（せん断面のテフロン加工と供試体の上下移動が可能）

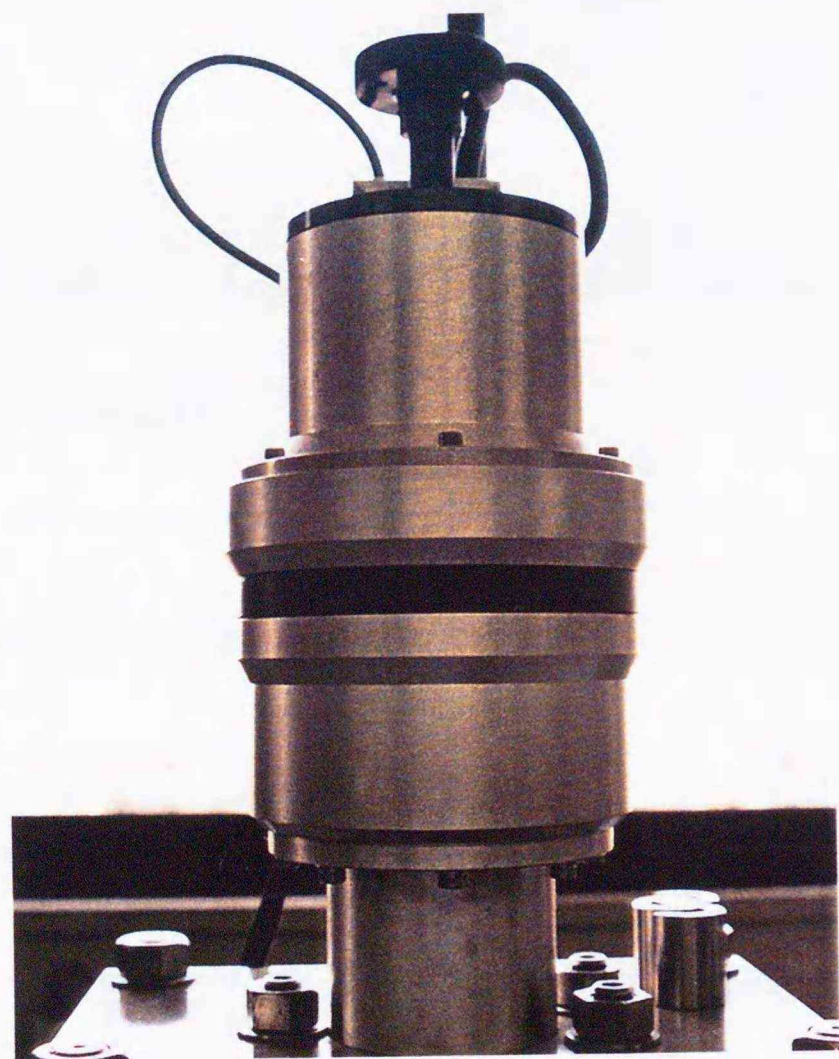


写真-5.5 垂直力载荷用デジタルサーボモーター

5. 3 カオリン粘土による試験実施例

5.3.1 繰り返し一面せん断試験

試験装置の特徴と性能を確認するために、カオリン粘土の繰り返し一面せん断試験を行った。試料および試験条件を表-5.1に示す。

圧密定圧条件での繰り返し一面せん断試験によるせん断応力(τ)－水平変位(HD)関係を図-5.4に、せん断応力(τ)－垂直応力(σ_v)の関係を図-5.5に示す。せん断応力は水平変位4～5mmにかけてピーク状態を呈し、繰り返しせん断により残留状態に収束している。残留状態での τ － σ_v 直線は原点を通っている。

定体積条件での繰り返し一面せん断試験によるせん断応力(τ)－垂直応力(σ_v)関係を図-5.6に示す。せん断応力は垂直応力の減少に伴い著しく減少している。図-5.7は垂直応力(σ_v)－累積水平変位(HD)関係であるが、水平変位の増加に伴い垂直応力が著しく減少し、水平変位100mm付近では垂直応力は20kPa以下になっている。今回の実験においても、せん断面からの試料漏れによる供試体の体積減少から垂直応力が著しく減少することが確認された。定体積試験では、垂直力を伝達する載荷板を固定するため、せん断面から試料が漏れたとき、供試体の体積減少による垂直力の減少は避けられない

表-5.1 試料および試験条件

試料	試料名	カオリン粘土 ($W_L=60\%$ 、 $I_p=27$)	
	供試体寸法	直径 60mm、高さ 20mm	
試験条件	試験条件	圧密定圧条件	圧密定体積条件
	圧密圧力	200,300,400kPa	400kPa
	せん断速度	0.02mm/min(水平変位3mmまで)	0.2mm/min
		0.2mm/min(水平変位3mm以降)	
	水平変位量	前後それぞれ6mm	
	累積水平変位量	240mm(繰り返し回数10回)	
せん断箱間隔	0.2mm		

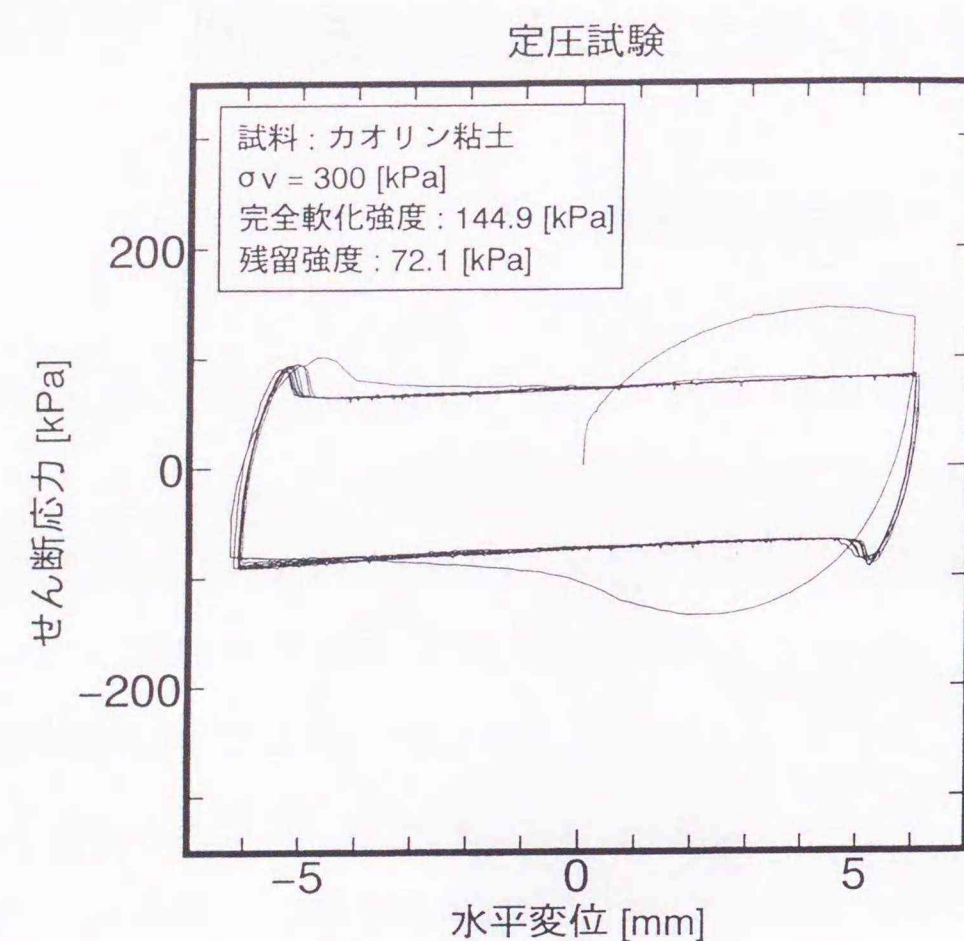


図-5.4 圧密定圧条件における繰返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ —水平変位[HD]の関係

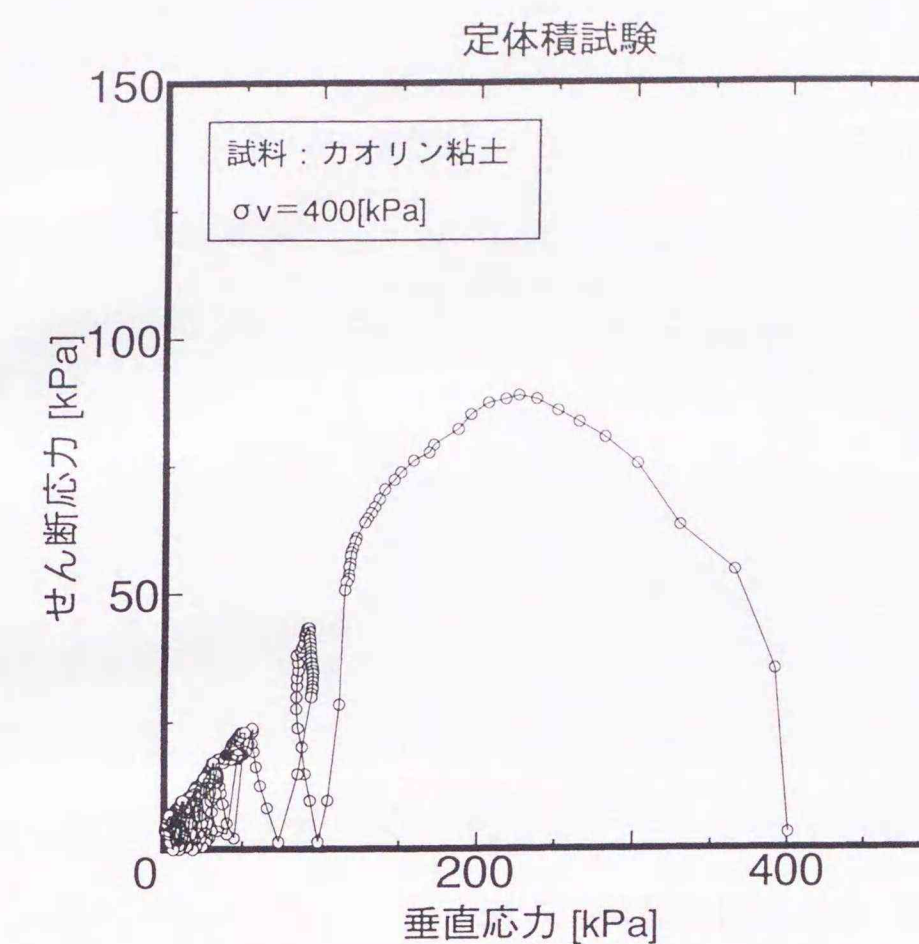


図-5.6 圧密定体積条件における繰返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ —垂直応力 $[\sigma_v]$ の関係

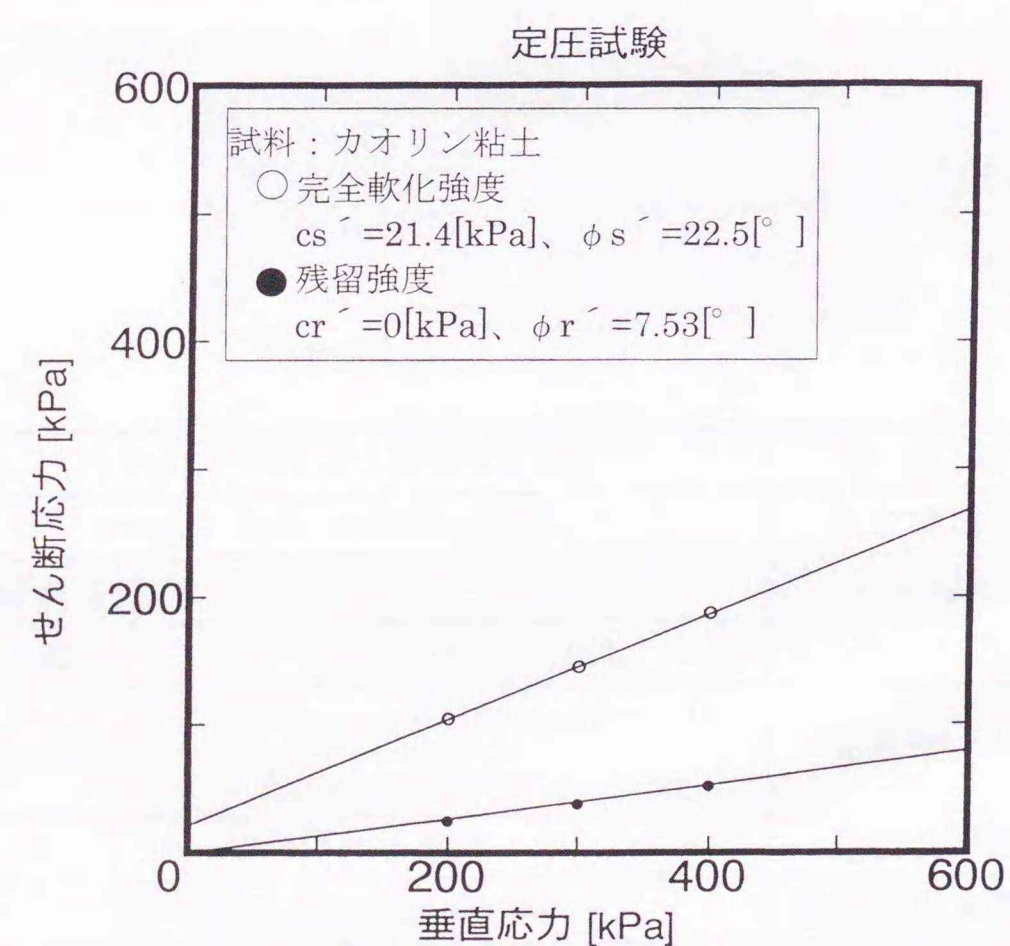


図-5.5 圧密定圧条件における繰返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ —垂直応力 $[\sigma_v]$ の関係

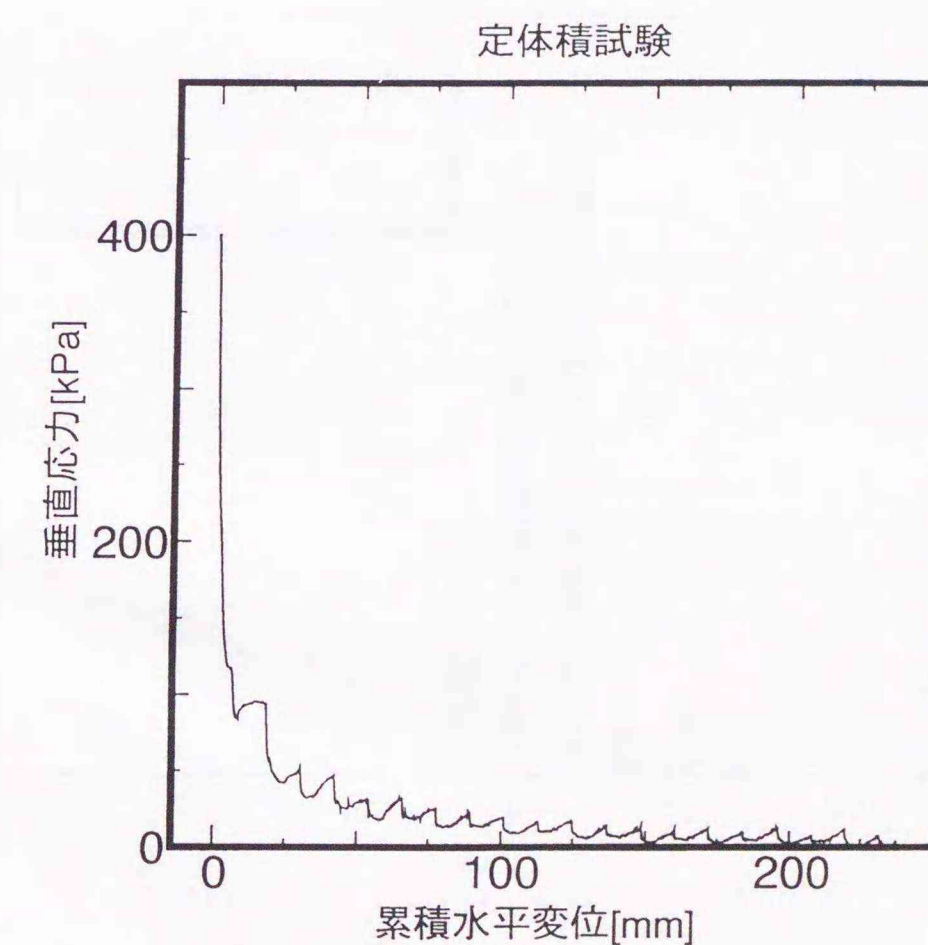


図-5.7 圧密定体積条件における繰返し一面せん断試験の垂直応力 $[\sigma_v]$ —累積水平変位[HD]の関係

5.3.2 試験後のせん断面のSEM観察

繰り返し一面せん断試験により形成されたせん断面の構造を評価するために、5.2.1節で得られた結果をもとに最も配向性の良い条件を選定し繰り返し一面せん断試験を実施した。すなわち、試験条件は圧密定圧条件とし、圧密圧力を200kPa、せん断速度を0.5mm/min、累積水平変位量を48mm（繰り返し回数2回）に設定した。せん断面の配向方向の評価方法は5.2.1節と同じである。

せん断面のSEM写真を写真-5.6に示す。SEMで観察されるところのせん断面は、1mm程度の厚さをもった“せん断層”をなし、層内には複数の変位せん断面が形成されている。写真の中ほどには最も連続性の良い主変位せん断面がみられ、ベッドがせん断方向に配向している。供試体はこの主変位せん断面を境に上下に分離した。主変位せん断面以外の変位せん断面のほとんどは連続性に乏しい。また、せん断層を構成するベッドは、全体的に初回のせん断方向に対して順目方向に傾斜している。これら層構造は、5.2.1節に類似している。

主変位せん断面の配向頻度分布を図-5.8に示す。主変位せん断面の配向度は $M=95.6\%$ で、配向方向の最頻値は $\alpha_{mode}=10^\circ$ である。せん断中に試料漏れが発生しているものの、主変位せん断面のベッドは、せん断面とほぼ平行に完全配向している。

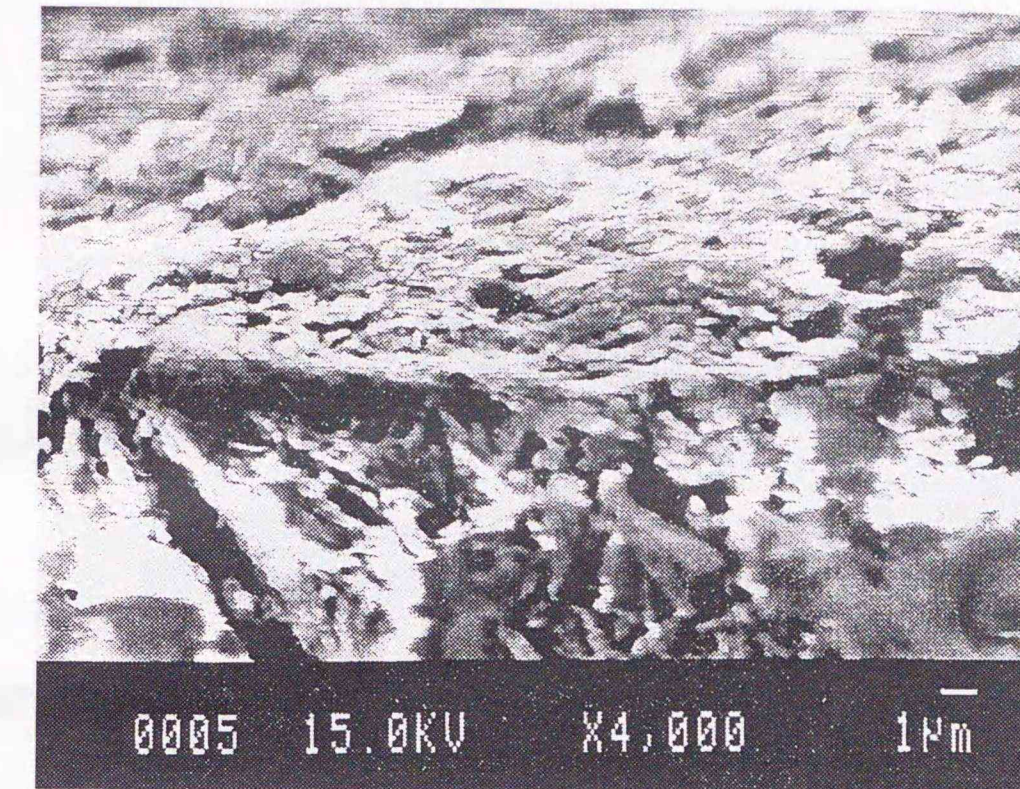


写真-5.6 せん断面のSEM写真（圧密定圧条件：累積水平変位48mm）

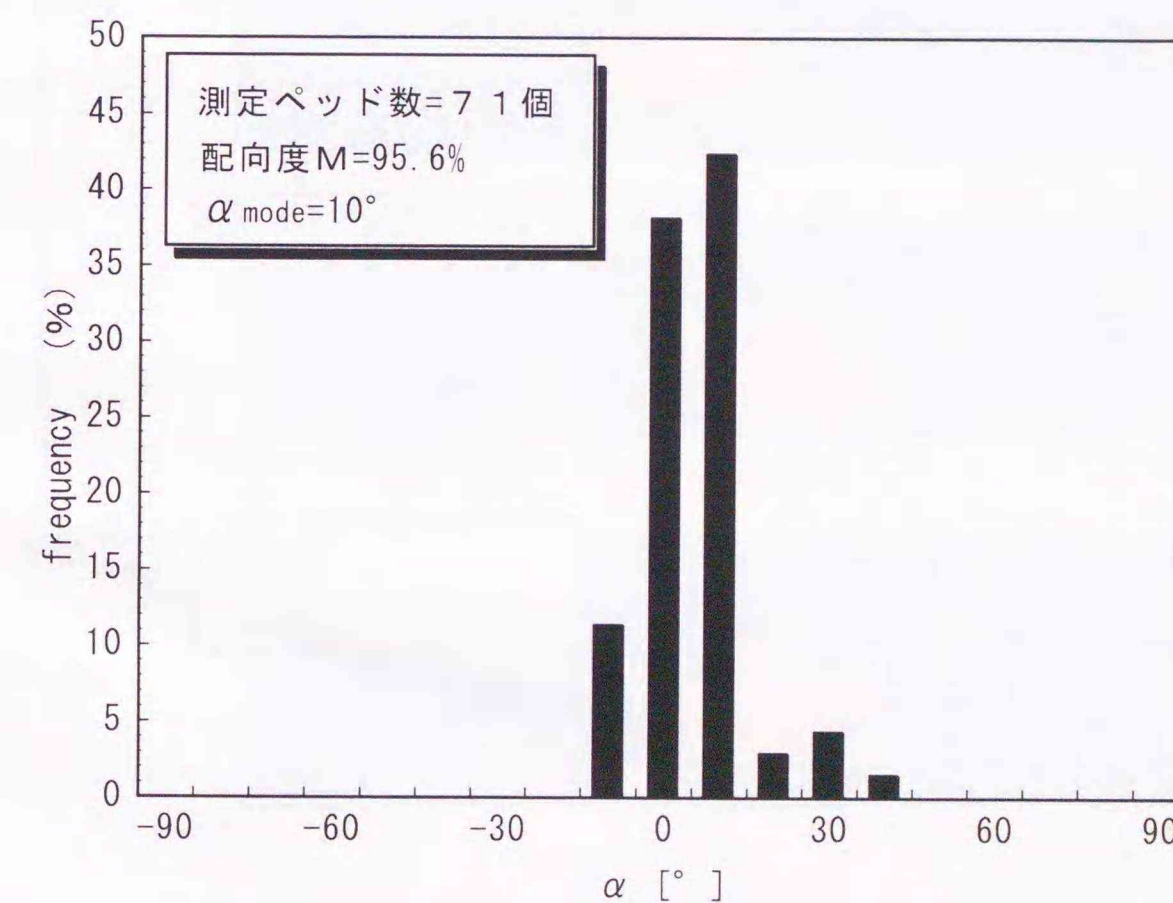


図-5.8 主変位せん断面の配向頻度分布

5. 4 他のせん断試験方法との比較

5.4.1 一方向繰り返し一面せん断試験との比較

本節では、せん断方向が常に一定である一方向せん断試験から得られた残留強度との比較により、繰り返し一面せん断試験の測定値の妥当性を検証する。一方向繰り返し一面せん断試験とは、常に同じ方向にだけせん断を繰り返すもので、せん断箱を戻すときにはせん断面での土粒子の再配列を極力避けるために垂直力を除荷する。すなわち、せん断を開始してから設定水平変位に達した時点で垂直応力を0kPaにし、せん断箱を手動で水平変位0mmまで戻す。そして直ちに設定垂直応力まで急速載荷して再びせん断を開始する。この一連の操作を残留状態になるまで繰り返す（図-5.9）。今回実施した試験は、一方向試験、繰り返し試験ともに圧密定圧条件とし、垂直応力200kPa、せん断速度0.2mm/min、水平変位6mmとした。試料は、150kPaで予圧密したNSF粘土を用いた。

試験結果を図-5.10に示す。一方向繰り返し一面せん断試験では、繰り返し回数6回（累積水平変位36mm）でせん断応力がほぼ一定値（ $\sigma_v=94.8\text{kPa}$ ）となっている。また、繰り返し一面せん断試験では、繰り返し回数5回（累積変位120mm）でせん断応力はほぼ一定値（ $\sigma_v=94.1\text{kPa}$ ）となっている。これらの異なる2つの試験より得られたせん断応力はほぼ一致しており、前述のせん断面の完全配向と同様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が確認された。

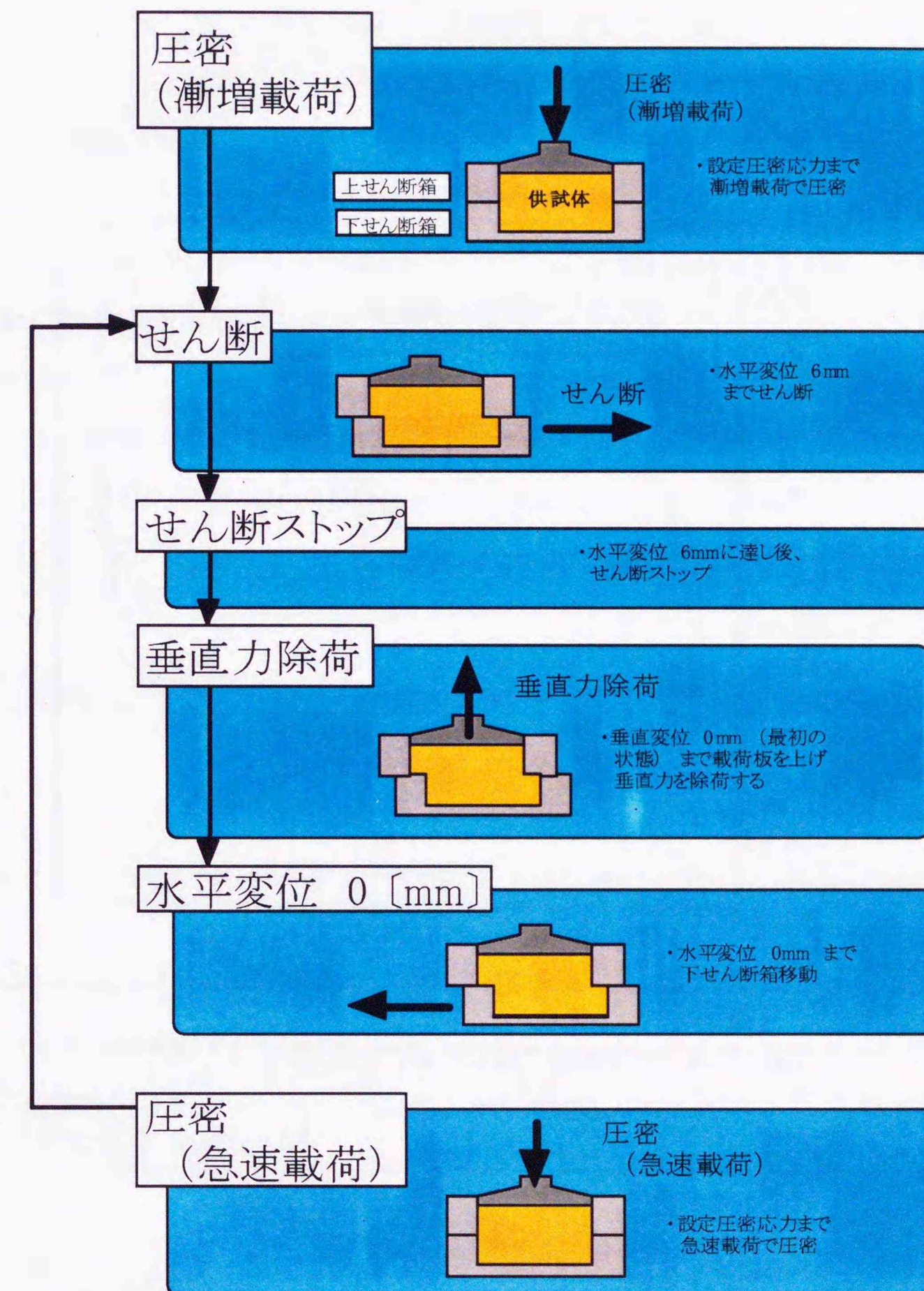


図-5.9 一方向繰り返し一面せん断試験方法

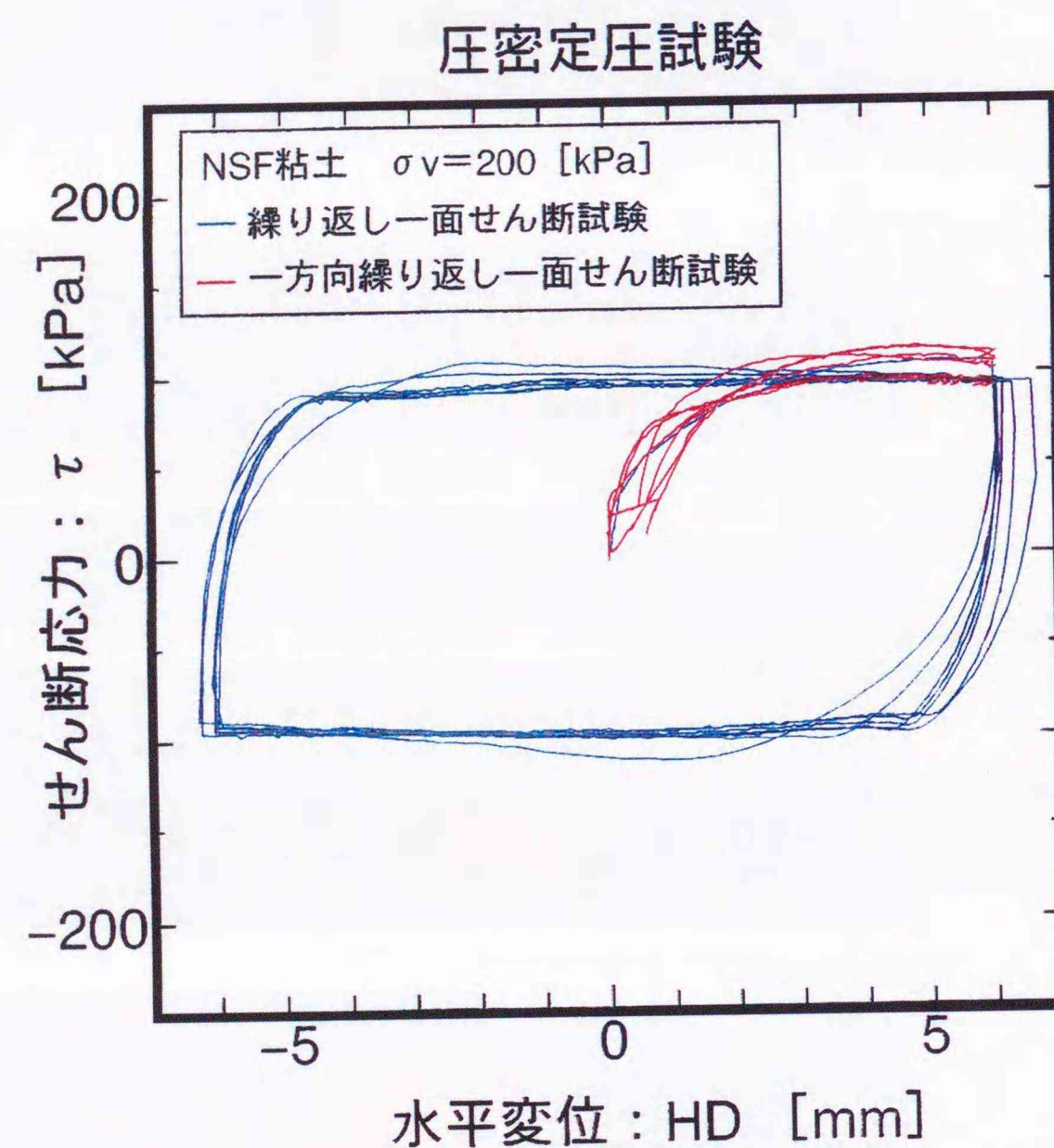


図-5.10 一方向繰り返し一面せん断試験および繰り返し一面せん断試験のせん断応力[τ]—水平変位[HD]の関係

5.4.2 リングせん断試験との比較

リングせん断試験機は、第4章で述べたとおりドーナツ状の供試体を用いて上下せん断箱の相対回転運動により一方向の無限せん断を可能とした試験機で、地すべり粘土の残留強度を測定し得る試験機として広く利用されている。しかし、構造が複雑で供試体をドーナツ型に成形するため、不攪乱試料の残留強度を得ることは容易ではない。従来、リングせん断試験機に比べ繰り返し一面せん断試験機から得られる残留強度が大きいことが報告されている^{7), 8), 9)}。

表-5.2に山形県銅山川地すべりより採取されたすべり面粘土のリングせん断試験¹⁰⁾と繰り返し一面せん断試験の結果を示す。リングせん断試験結果($c_r' = 0 \text{ kPa}$, $\phi_r' = 3.24^\circ$)は、繰り返し一面せん断試験結果($c_r' = 0 \text{ kPa}$, $\phi_r' = 2.09^\circ$)より大きな値を示している。ちなみに、これと同様の結果が、現場くり返し一面せん断試験機¹⁰⁾($c_r' = 0 \text{ kPa}$, $\phi_r' = 3.05^\circ$)により得られている。このように今回の実験では、繰り返し一面せん断試験がリングせん断試験より小さい値が得られる結果を示し、必ずしもリングせん断試験が常に小さな値を示すものでないことが判る。

表-5.2 銅山川地すべり面粘土の繰り返し一面せん断試験とリングせん断試験の結果

	c_r' [kPa]	ϕ_r' [kPa]
繰り返し一面せん断試験	0.0	2.3
リングせん断試験	0.0	3.2

5. 5 地すべり解析用強度パラメータの算定例

5.5.1 Mitachiら¹¹⁾の強度パラメータの決定方法

地すべり安定解析に用いる強度パラメータの妥当性は、斜面の安定性評価の信頼性に関わる決定的要素となっている。実務では、強度パラメータの決定を経験的解析手法である“逆算法”により行っているのがほとんどである。この方法は、見かけの粘着力(c)を $c_0 \equiv d$ (kN/m^2) (d :地すべり土塊の厚さ(m))として求め、現状安全率 $F_0=1.0$ とおいた安定計算式に c_0 の値を代入してせん断抵抗角(ϕ)を求めている。これは土塊の荷重均衡をもとにした力学的条件だけで c 、 ϕ を決定しており、すべり面での強度特性を考慮していない点が問題である。

Mitachiら¹¹⁾は、地すべり安定解析に採用すべき(c_0 、 ϕ_0)の組み合わせはピーク強度(c_p 、 ϕ_p)と残留強度(c_r 、 ϕ_r)との間でOCR(過圧密比)の関数として連続的に変化するものと考え、対象とする地盤の強度特性を反映させた形での c - $\tan \phi$ 図の利用法を提案している。図-5.11は、地すべりの要因である間隙水圧上昇にもとづく有効応力の変化による強度の減少をOCRの関数として表現したもので、 c - $\tan \phi$ 図とこの強度変化との関係を組み合わせることによって地すべりの設計用強度パラメータの決定に利用できる。この方法は、 c - $\tan \phi$ 図にせん断試験結果を組み入れることによって、(c 、 ϕ)の取り得る値の範囲を、単に解析上の条件に基づく範囲ではなく、物性値としての変動範囲に限定している点で特徴的である。

実務的利用方法は、地すべり面付近から採取した不攪乱試料を用いて、「小型自動繰返し一面せん断試験装置」によって、ピーク強度(c_p 、 ϕ_p)および残留強度(c_r 、 ϕ_r)を、また繰返し試料を用いて完全軟化強度(c_s 、 ϕ_s)を求める。これら3つの強度を c - $\tan \phi$ 図中にプロットし、各々を折れ線で結ぶ。なお、図-5.11に示されたように強度の減少は、本来ならば曲線ABCとして表されるが、 B' 、 B'' を求めることは事実上出来ないで、折れ線ABCを近似として用いる。次に対象地盤の安定解析に必要な諸データから $F_s=F_0$ に対応する σ 、 τ を求めてPQ線を引いて図-5.12に示したように直線の交点Dから所要の強度パラメータ(c_0 、 ϕ_0)を求める。

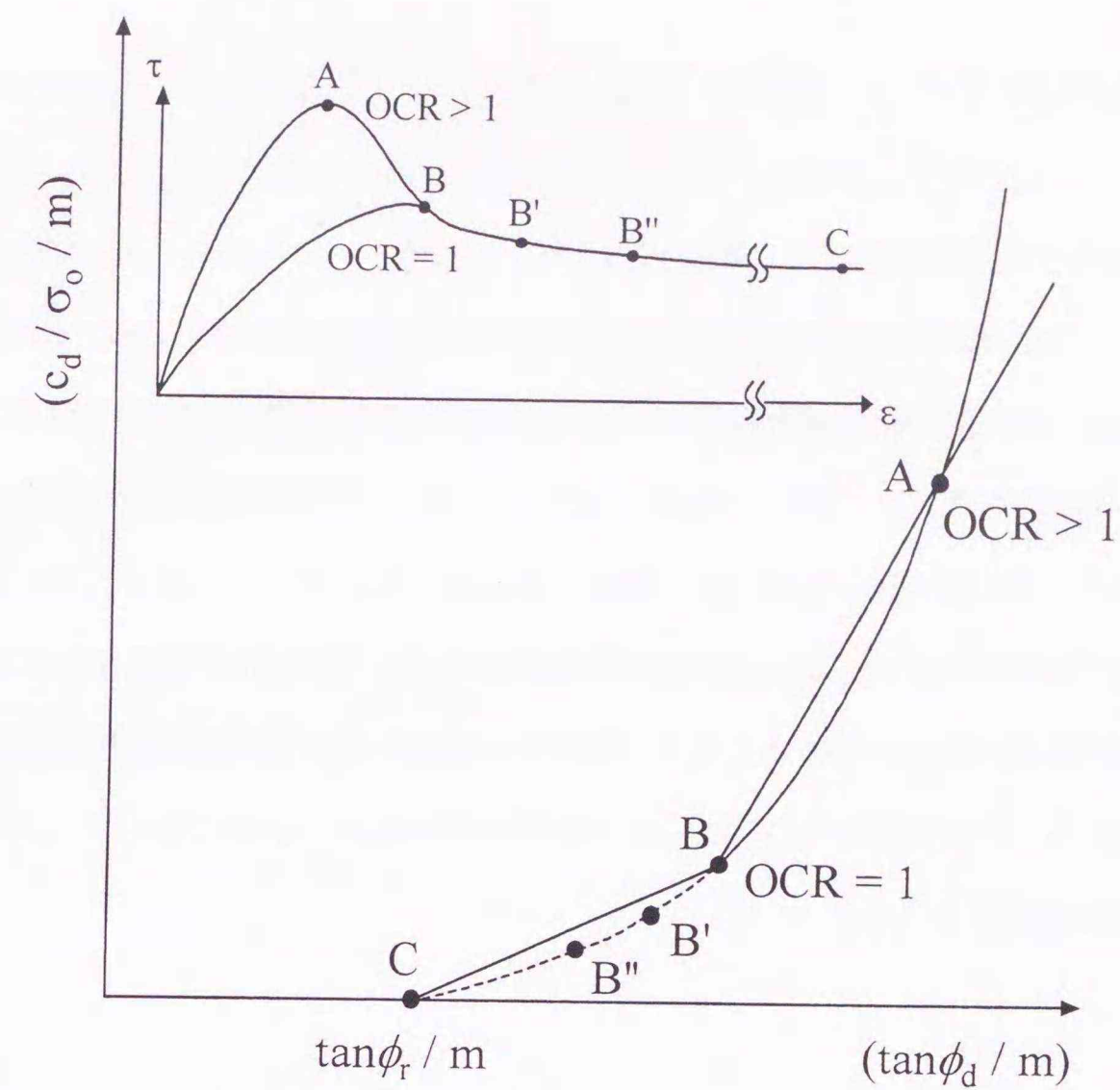


図-5.11 OCRに伴う強度の変化¹¹⁾

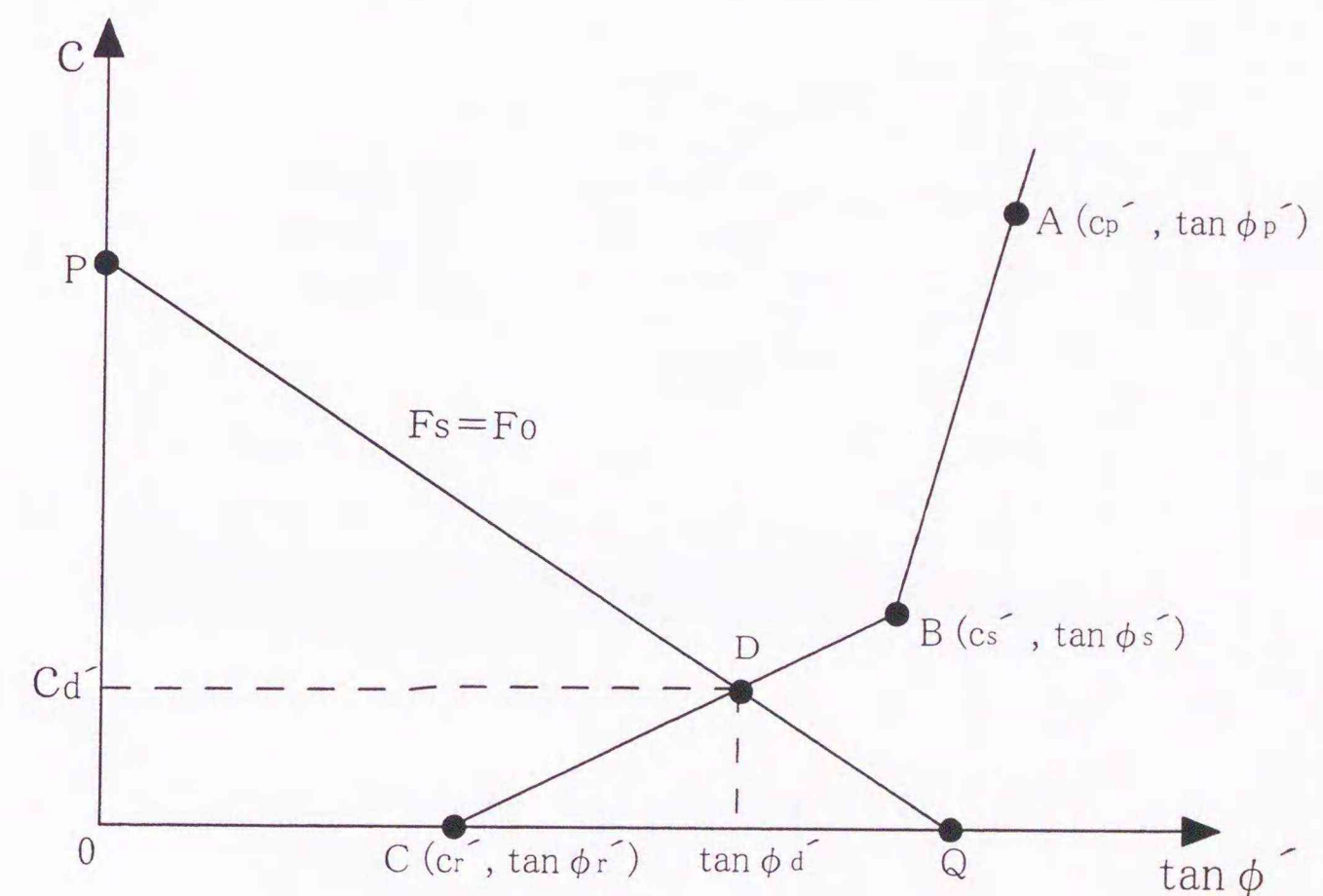


図-5.12 c - $\tan \phi'$ 図による設計用強度パラメータの決定¹¹⁾

5.5.2 銅山川地すべりの強度パラメータ

(1) 銅山川地すべり概要

銅山川地すべりは、1996年5月に山形県最上郡大蔵村で発生した最大幅1100m、斜面長1200m、すべり面深度130m、地表面の平均傾斜角 11° の大規模地すべりで、滑落崖付近を通る国道458号線の一部が滑落する被害を受けた。地すべりの移動層は、大部分が第四紀更新世のシラス(肘折火砕流堆積物)であるが、すべり面は、新第三紀中新世の泥岩層(古口層)の層理面に形成されている(図-5.13)。また、地すべり末端部は銅山川により開析され、地形的に不安定な状態にあり、これまで繰り返し地すべりが発生していることが、地すべり地内に形成された同心円状の陥没状地形からも明らかである。これら銅山川の下刻により形成された高さ5~25mの急崖では、すべり面を数百mにわたり直接観察できる。

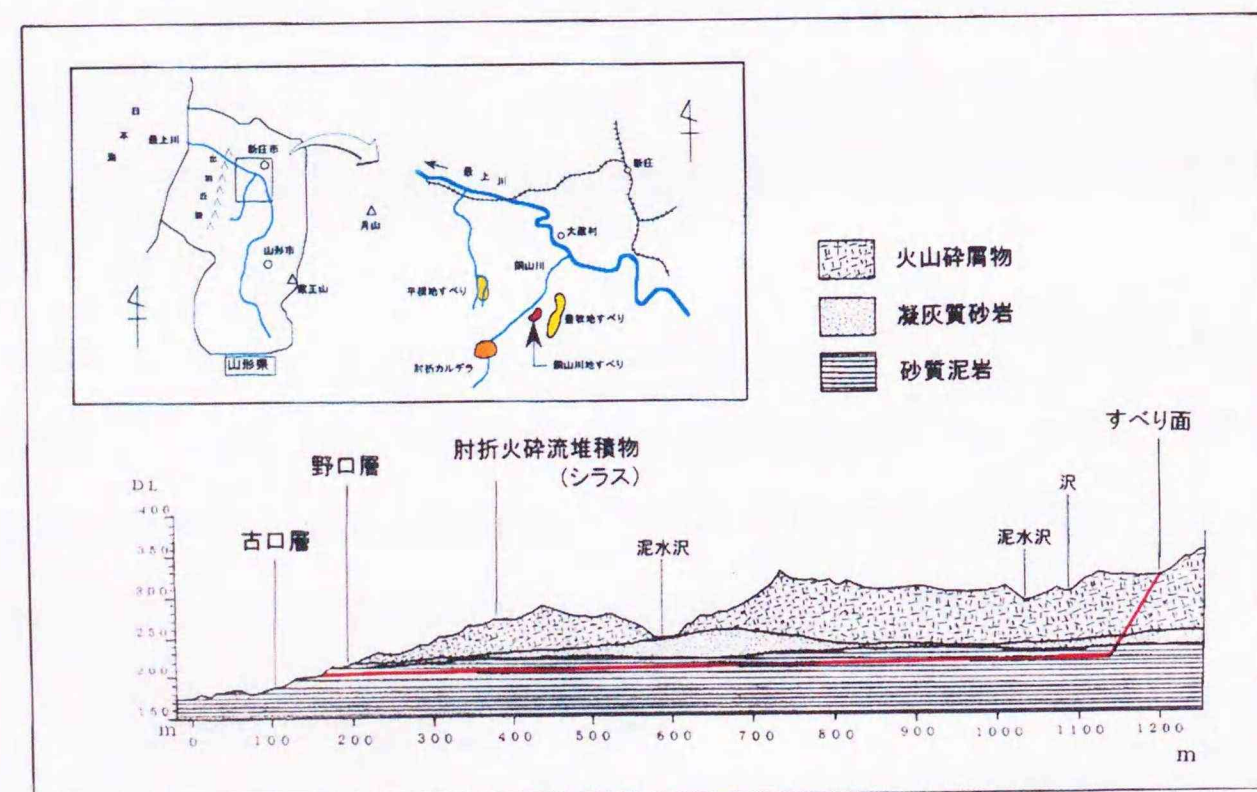


図-5.13 銅山川地すべり位置 地質縦断面図

(2) 強度パラメータの算出

本研究では、銅山川地すべりの末端部より採取されたすべり面粘土の繰返し一面せん断試験を行い、強度パラメータを求めた。試験は、すべり面付近から採取された試料を繰返し予圧密(圧力:100kPa)した試料について、垂直応力 $\sigma_v=200, 300, 400\text{kPa}$ で圧密後の定圧繰返し一面せん断試験(繰返し回数15回)を行った。図-5.14に $\tau-\sigma_v$ 関係、図-5.15に $\tau-HD$ 関係を、表-5.3に繰返し一面せん断試験結果を示す。本地すべりの主断面でのフェレニウス法による安定計算の結果より、現状安全率 $F_s=1.0$ に対する (c, ϕ) の取り得る組み合わせは直線式として $c'=-681.9 \tan \phi' + 109.1 (\text{kPa})$ で表される。表-5.3の試験結果を図-5.16の $c-\tan \phi$ 図にプロットすると、実験値(B, C)を結ぶ直線と現況安全率 $F_s=1.0$ での (c, ϕ) の組み合わせを示す直線P, Qとの交点Dとして、 $c_0=18.0 (\text{kPa})$, $\tan \phi_0=0.13$ が強度パラメータとして得られる。

表-5.3 銅山川地すべり面粘土の圧密定圧条件における繰り返し一面せん断試験結果

試料名	銅山川地すべり面粘土	
完全軟化強度	cs' [kPa]	36.4
	$\phi s'$ [°]	13.0
残留強度	cr' [kPa]	0.0
	$\phi r'$ [°]	2.3

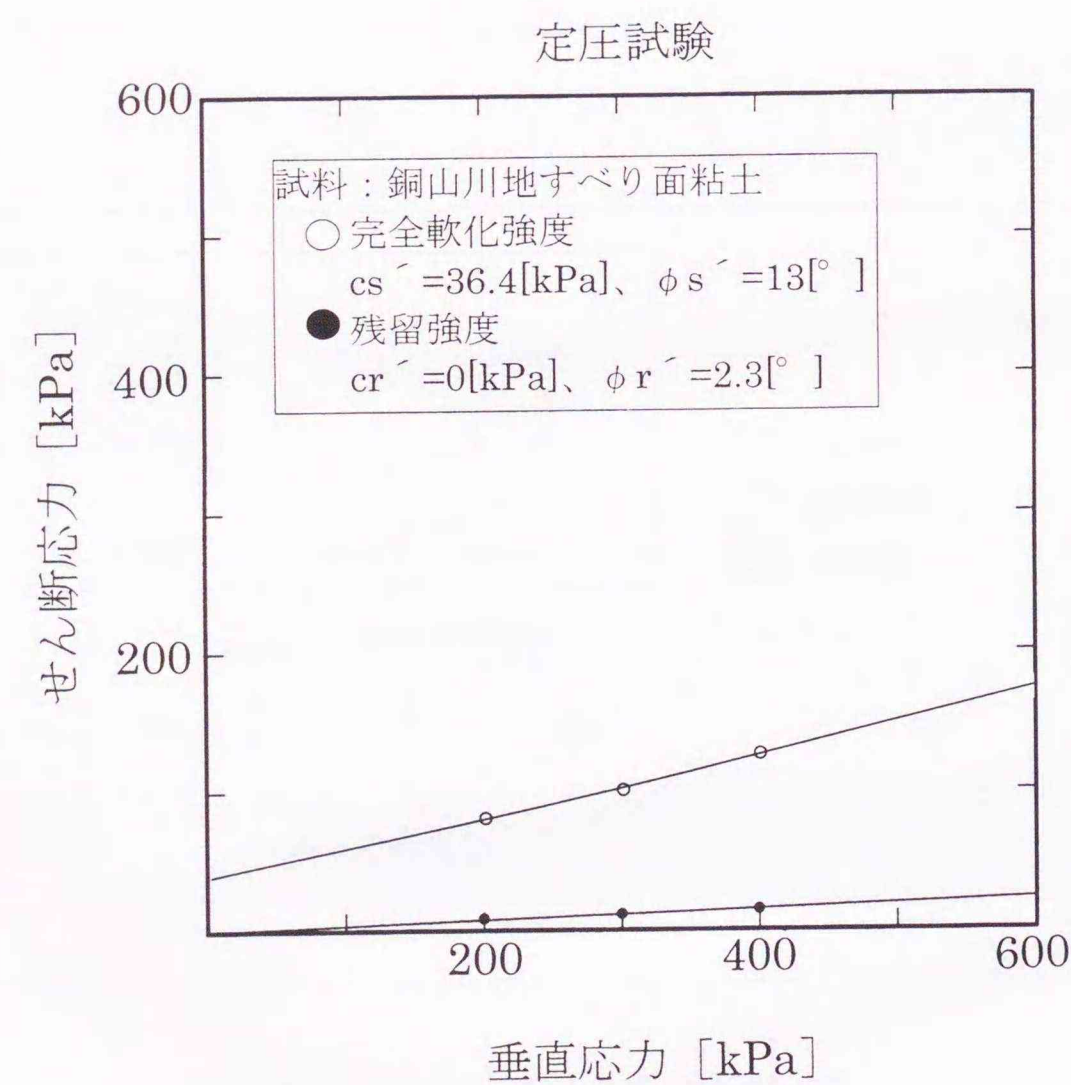


図-5.14 圧密定圧条件における繰り返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ —垂直応力 $[\sigma_v]$ の関係

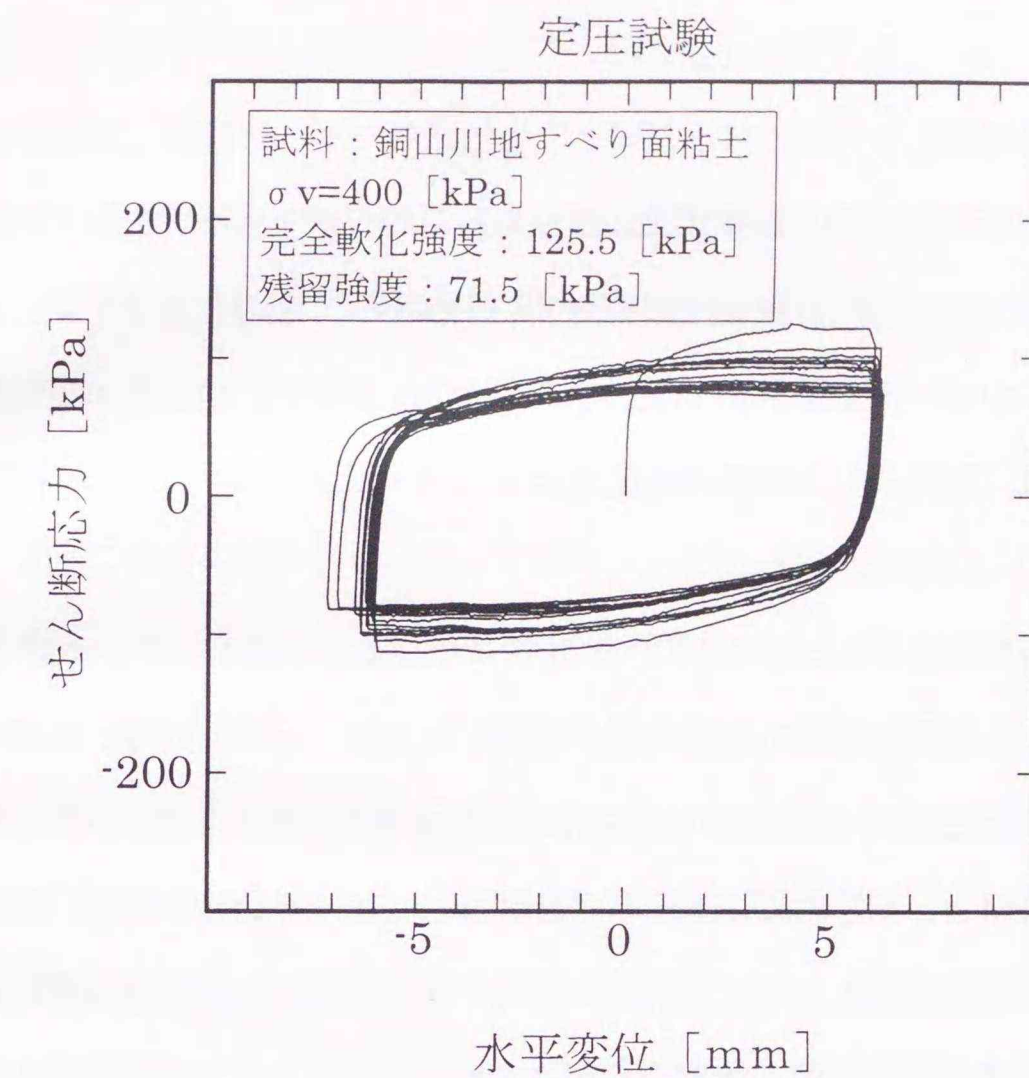


図-5.15 圧密定圧条件における繰り返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ —水平変位[HD]の関係

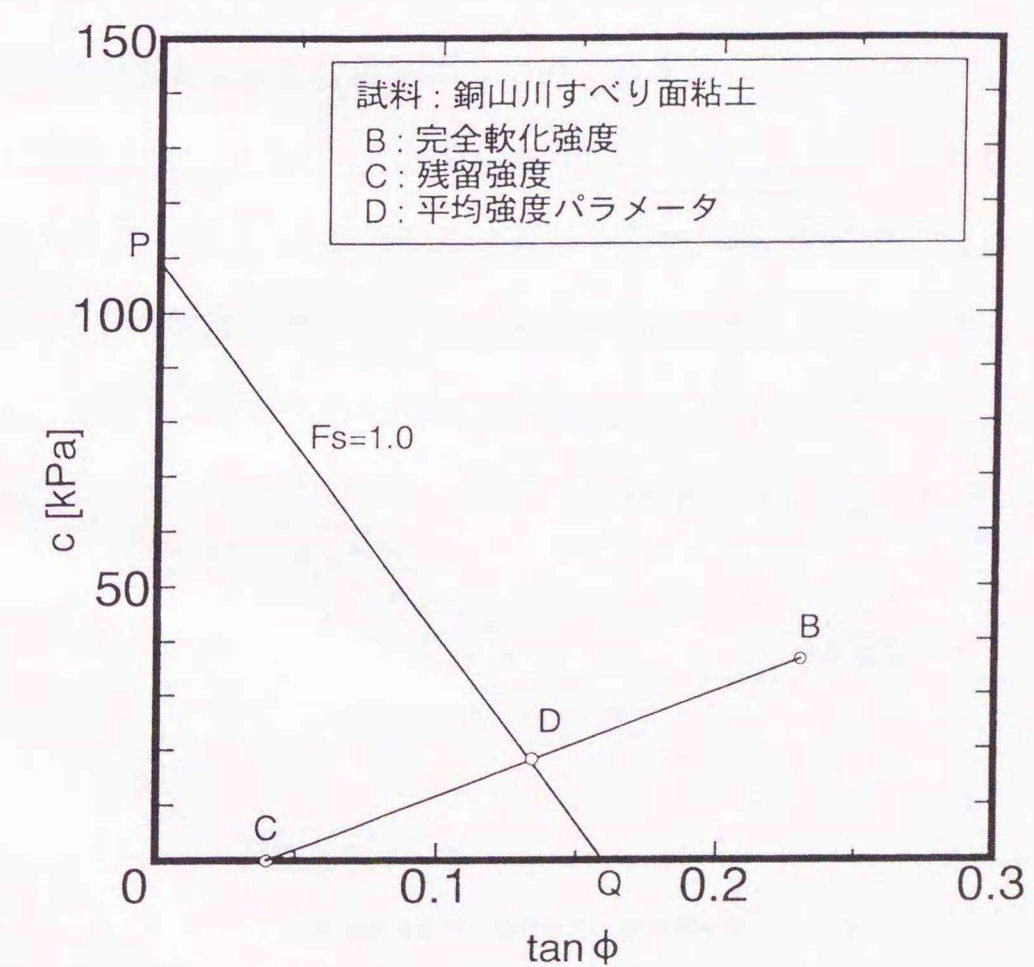


図-5.16 設計用強度パラメータの決定（銅山川地すべり）

5.5.3 横手地すべりの強度パラメータ

(1) 横手の地すべり概要

本地すべりは、1998年4月に秋田県横手市の道路建設に伴う切土斜面で発生した法面すべりである(図-5.17)。現場では1997年4月にも法面東側が一部崩壊し、このときは切土により修復している。地すべりの規模は、最大幅25m、斜面長26m、すべり面深度7m、地表面の傾斜角 45° である。地すべりの移動層は、新第三紀中新世の黒色泥岩(相野々層)からなり、すべり面はこの泥岩中に形成されている。

本地すべりは、過去に発生した海底での古期地すべりと密接に関わっている¹²⁾。すなわち、新第三紀中新世中期から後期にかけて相野々層が堆積したとき、それと同時に奥羽脊梁山脈が急速に隆起をはじめたことにより、海底において古期岩盤地すべりが発生した。古期岩盤地すべりは、凝灰岩層を地すべり面としてそれより上部の泥岩層が岩塊状に移動している。この古期岩盤地すべりによって、すべり面に関与するせん断面の形成、亀裂発達による岩盤強度の低下、内部応力の蓄積等、現在の地すべりの地質的素因が形成されたと考えられている。

本地すべりでは、こうした背景をもとに、流れ盤斜面の切り取りによる人為的作用と融雪期における間隙水圧の上昇が誘因となり発生したものと考えられている。

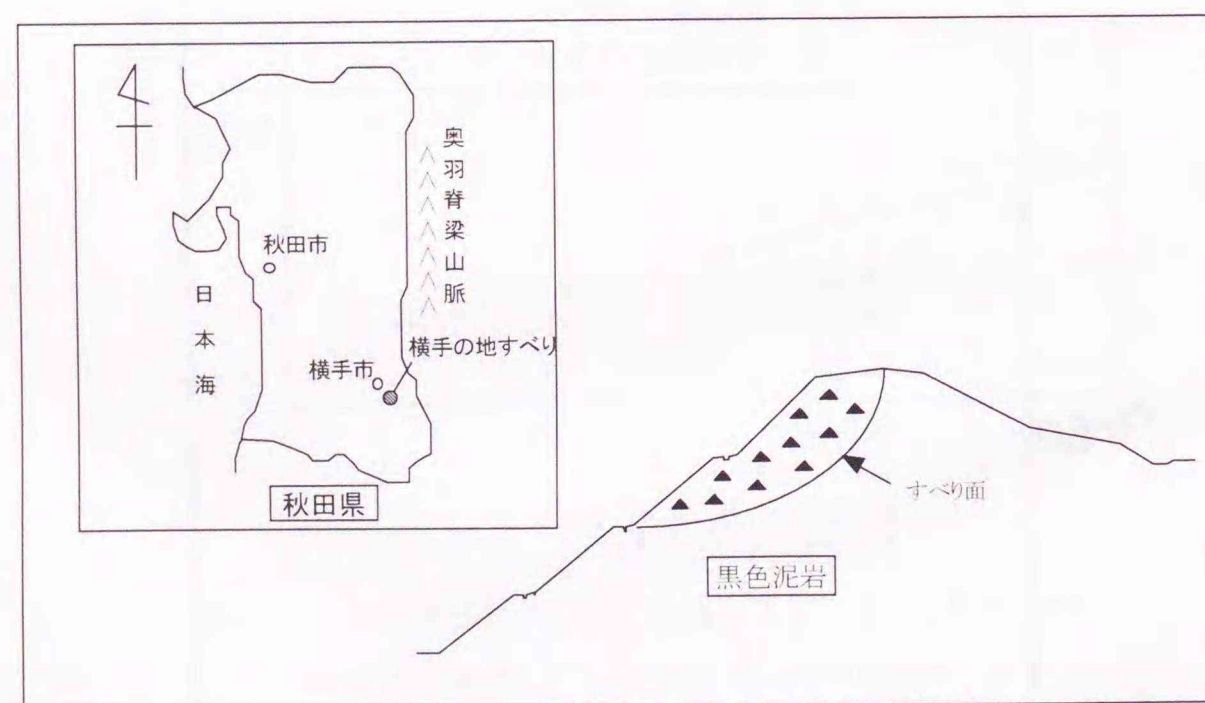


図-5.17 横手市法面すべり位置 地質縦断面図

(2) 強度パラメータの算出

本研究では、この法面すべりより採取されたすべり面粘土の繰返し一面せん断試験を行い、強度パラメータを求めた。試験は、すべり面付近から採取された試料を、繰返し予圧密(圧力:100 kPa)した試料について、垂直応力 $\sigma_v=200, 300, 400$ kPaで圧密後の定圧繰返し一面せん断試験(繰返し回数15回)を行った。さらに、原位置強度を求めるために、現地においてせん断箱中に直接すべり面粘土を押し込むことで不攪乱試料を採取し、同日、研究室で一面せん断試験を実施した。採取したすべり面粘土には、鏡肌を呈するような主変位せん断面は確認されなかったため、せん断箱のせん断面とすべり面との面合わせは行っていない。なお、原位置強度とは不攪乱状態におけるすべり面粘土の最大せん断強度のことをさす(すべり面では、せん断により粒子構造が乱されていると考えられるため、ピーク強度と区別した)。図-5.18に $\tau-\sigma_v$ 関係、図-5.19に $\tau-HD$ 関係を、結果を表-5.4に示す。本地すべりの主断面でのフェレニウス法による安定計算の結果より、現状安全率 $F_s=1.0$ に対する (c, ϕ) の取り得る組み合わせは直線式として $c'=-58.7 \tan \phi' + 36.4$ (kPa)で表される。表-5.4のデータを図-5.20の $c-\tan \phi$ 図にプロットすると、実験値(A-B-C)を結ぶ直線の延長と現況安全率 $F_s=1.0$ での (c, ϕ) の組み合わせを示す直線P、Qとの交点Dとして、 $c_0=15$ (kPa)、 $\tan \phi_0=0.35$ が強度パラメータとして得られる。

横手地すべりのすべり面には、鏡肌がほとんど確認されないことから、すべり面粘土のせん断強度は、残留強度より大きいものと推定される。本研究で得られた平均強度パラメータは、残留強度より大きく、かつすべり面粘土の原位置強度Aに近い値となっている。前述のとおり原位置強度は、すべり面で実際に発揮されているせん断強さに相当するものであり、得られた平均強度パラメータがこれに近い値をとることは、「小型自動繰返し一面せん断試験装置」より求められたせん断強度が、Mitachiらの設計用強度パラメータ決定方法を利用することにより実務に適用できることを示している。なお、本地すべりのすべり面は、肉眼観察によると鏡肌がほとんど観察されず、繰返し粘土に類似しているなど性状変化が少ないことから、すべり面位置による強度変化はあまりないと思われる。

表-5.4 横手法面すべり面粘土の圧密定圧条件における繰返し一面せん断試験結果

試料名	横手地すべり面粘土	
原位置強度	c'_1 [kPa]	11.4
	ϕ'_1 [°]	18.8
完全軟化強度	c'_s [kPa]	5.7
	ϕ'_s [°]	16.7
残留強度	c'_r [kPa]	0.0
	ϕ'_r [°]	10.5

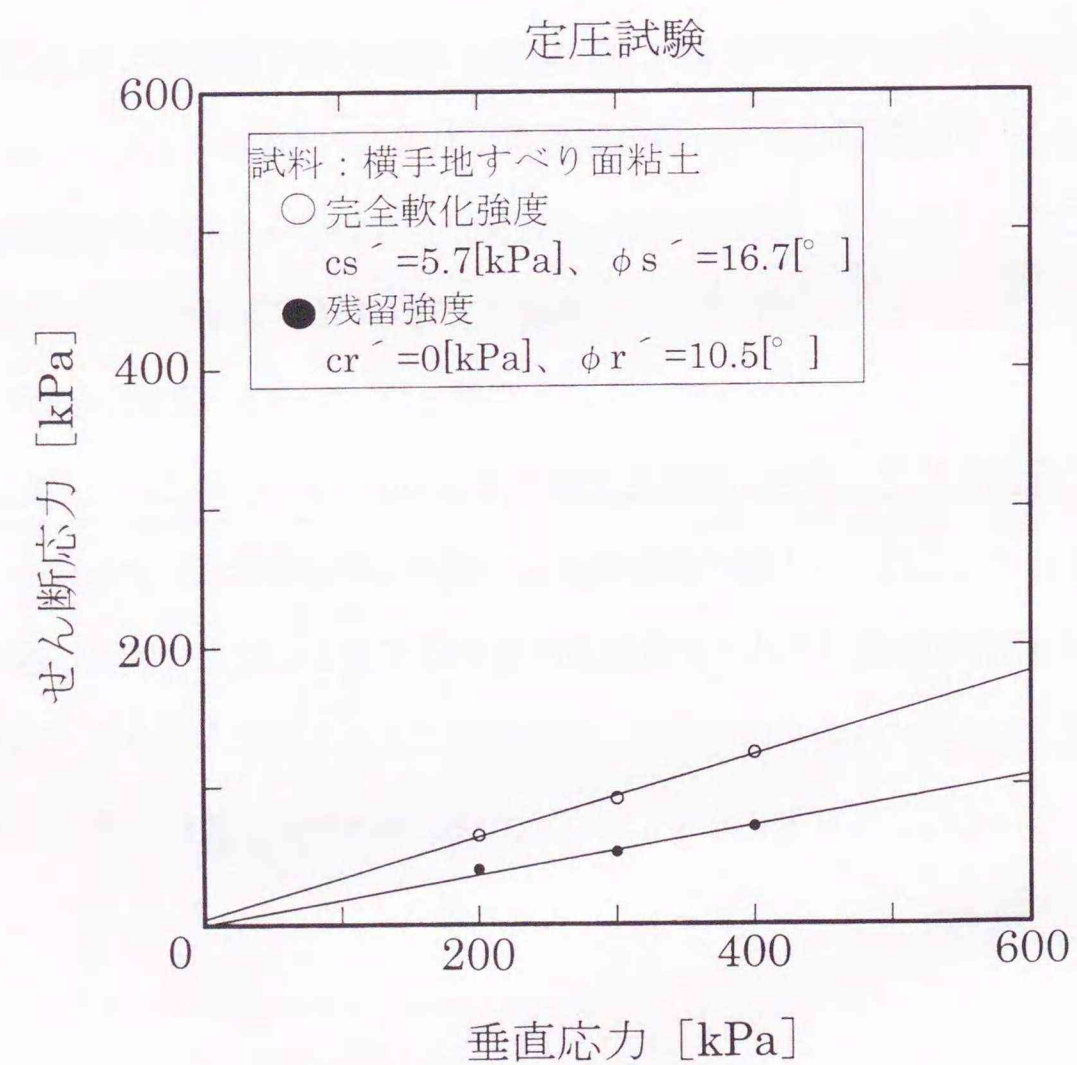


図-5.18 圧密定圧条件における繰返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ －垂直応力 $[\sigma_v]$ の関係

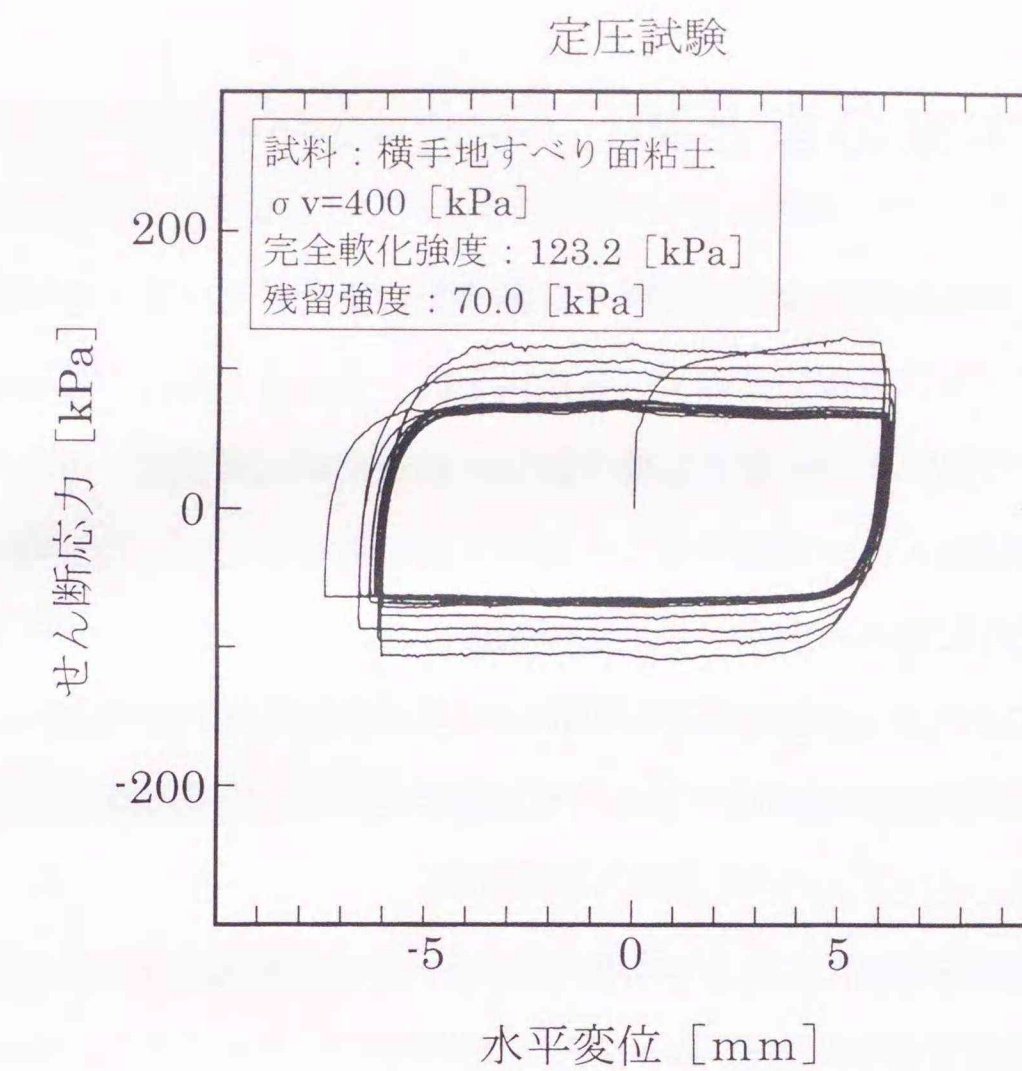


図-5.19 圧密定圧条件における繰返し一面せん断試験のせん断応力 $[\tau]$ －水平変位[HD]の関係

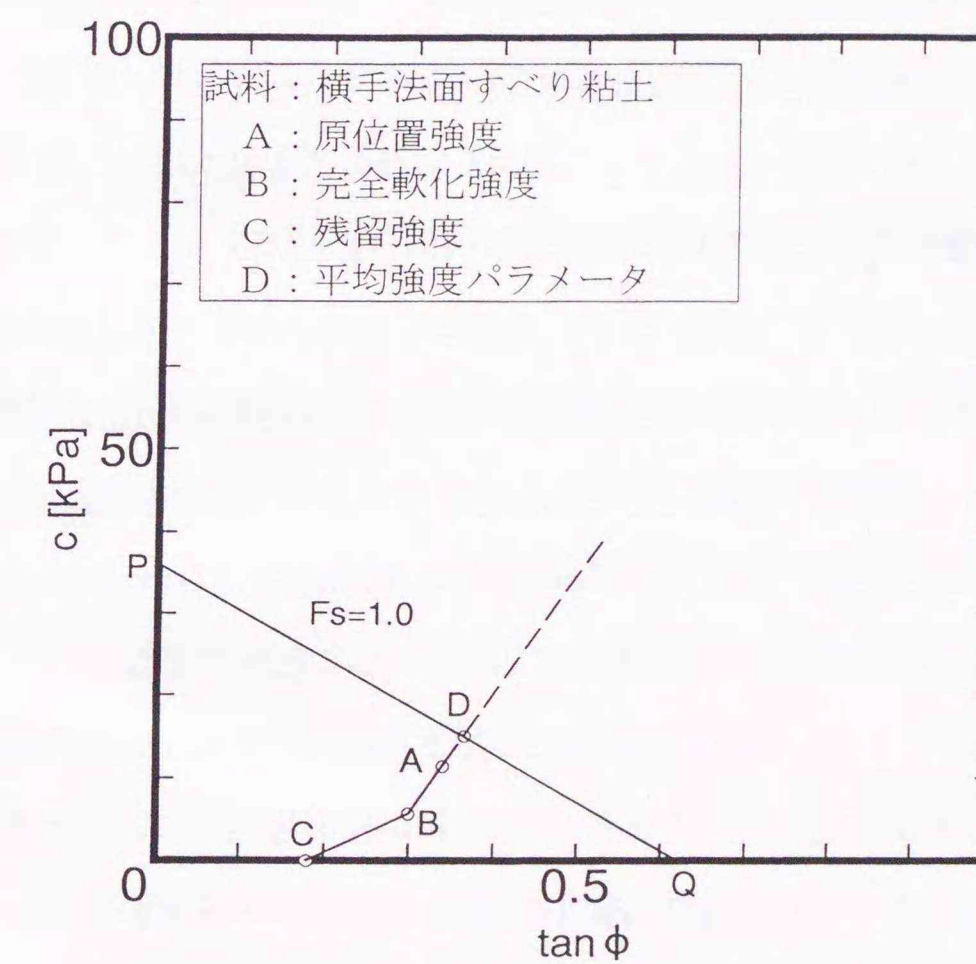


図-5.20 設計用強度パラメータの決定（横手法面すべり）

5. 6 本章のまとめ

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、実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、残留強度を精度よく測定し得る実用性に優れた「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」を開発し、粘土を用いたリングせん断試験と一方向繰り返し一面せん断試験結果との比較から、装置の測定精度を確認した。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Mitachiらの決定方法により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。主要な結論を以下に示す。

(1) 斜面安定問題を対象にしたときの繰り返し一面せん断試験機の具備すべき条件は以下のようである

- ① ピーク強度、完全軟化強度、残留強度を求めることができること
- ② せん断箱からの試料漏れ対策を施していること
- ③ 含すべり面試料の試験が実施できること
- ④ 広範囲なせん断速度を選択できること
- ⑤ 試料の粒径に応じたせん断箱間隔の設定ができること
- ⑥ 試験機が小型・軽量であること
- ⑦ 計測／制御の自動化が図られていること

(2) 地すべり安定解析のためのせん断強度を測定し得る試験装置として開発した「小型自動繰り返し一面せん断試験装置」の特徴は以下のようである。

- ① 小型自動繰り返し一面せん断試験装置は、粘性土および砂質土のピーク強度、完全軟化強度、残留強度を精度良く測定することができる。
- ② 本装置は、上下せん断箱と試料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することができる。せん断箱が相対変位しているときの摩擦力はピーク強度と完全軟化強度の補正に、相対変位ゼロのときの試料漏れによる摩擦力は残留強度の補正に利用される。
- ③ せん断箱には、せん断箱と供試体せん断面間の摩擦を軽減するために、せん断

面部分にテフロン加工が施されている。

- ④ すべり面をブレカット面として利用する「含すべり面試験」を行うために、せん断箱側面をアクリルを用いて可視化し、せん断箱底盤を上下に移動できる構造となっている。
- ⑤ せん断速度は、低速ギアボックスの組み合わせにより広範囲（0.001～1.7mm/min）に調節できる。
- ⑥ せん断箱間隔は、固定板と上部せん断箱との間にギャップスペーサーをセットすることにより0.01mm, 0.1mm, 0.5mmに調節できる。
- ⑦ 垂直力載荷システムに変位制御方式（デジタルサーボモーター）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。
- ⑧ 軽量かつコンパクトで現場への持ち込みが可能で、かつデータ収録と試験時（定圧試験・定体積試験）の制御がパソコンにより自動化されている。

(3) NSF粘土を用いた繰り返し一面せん断試験と一方向繰り返しせん断試験との残留値の比較では両者はほぼ同じ値をとり、銅山川地すべり面粘土を用いたリングせん断試験との比較では、繰り返し一面せん断試験の残留値が小さい値を示した。従来、リングせん断試験に比べ繰り返し一面せん断試験から得られる残留強度が大きいことが報告されているが、このように、試料漏れ対策を施した繰り返し一面せん断試験においては、必ずしもリングせん断試験より大きな残留値をとるとは限らず、試料漏れ対策の重要性が確認された。

(4) 本試験装置より求められたせん断強度を用いてMitachiらの方法により実際の地すべり地の設計用パラメータを決定した。求められた平均強度パラメータは、すべり面粘土の不攪乱試料から得られた原位置強度に近い値を示しており、対象となった地すべりが、すべり面の性状から場所によるすべり面強度の変動が少ないと推定されることから、両者が近似していることは、装置の実務上の有効性を示すものである。

＜参考文献＞

- 1) 中村浩之・清水清文:すべり面におけるせん断強度決定のための土質試験法, 地すべり, Vol. 15, No. 2, pp. 25~32, 1978.
- 2) 眞弓孝之:すべり面粘土の現場一面せん断試験～定体積試験の試み～, 第35回地すべり学会研究発表講演集, pp. 333~336, 1996.
- 3) 大河原正文・三田地利之・小野寺賢一:地すべり解析用小型自動繰返し一面せん断試験装置の開発と試験方法の最適化, 地すべり, 第37巻, 第1号, pp. 35~43, 2000.
- 4) M. Okawara, T. Mitachi and M. Tanada:Development of an automatic cyclic direct shear test apparatus for landslide slope stability analysis, International Symposium on Slope Stability Engineering, Geotechnical and Geoenvironmental Aspects, Vol. 2, pp. 715~719, 1999.
- 5) 眞弓孝之・山崎孝成・須藤充:くり返しせん断試験による土質定数の評価, 第34回地すべり学会研究発表講演集, 6-8, pp. 355~358, 1995.
- 6) 澁谷啓・三田地利之・高田増男:粘性土の一面せん断試験に関するいくつかの提案, 土質工学会直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム, I-5, pp. 127~134, 1995.
- 7) Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A. and Brown, J. D. :A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength Geotechnique, Vol. 21, pp. 273~328, 1971.
- 8) 宜保清一:残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度, 地すべり, Vol. 31, No. 3, pp. 24~30, 1994.
- 9) 矢田部龍一・八木則男・向谷光彦・榎明潔:土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響, 土木学会論文集, No. 554/Ⅲ-37, pp. 139~146, 1996.
- 10) 徳留善幸・山科真一:銅山川地すべりすべり面粘土の土質定数について, 地すべり学会東北支部地すべり発表要旨, pp. 11, 1999.
- 11) T. Mitachi, M. Okawara and T. Kawaguchi:Method for determining design strength parameters for slope stability analysis, International Symposium on Slope Stability Engineering, Geotechnical and Geoenvironmental Aspects, Vol. 2, pp. 781~785, 1999.
- 12) 阿部真朗・森屋洋・盛合禧夫:奥羽脊梁山脈における大規模岩盤地すべりの地質的素因—秋田県・奥羽脊梁山脈西縁部—, 応用地質, 第35巻, 5号, pp. 193~204, 1994.

第6章 結 論

6. 1 研究成果の総括

本論文では, 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する基本概念を整理するとともに, より信頼性の高い斜面の安定解析のために残留強度を精度よく測定し得る実用的な試験装置を開発した。本研究において得られた結論を各章毎にまとめると以下のようなものである。

第1章では, 本研究の背景と目的において, 多大な物的・人的被害をもたらす斜面災害の対策として, その根幹をなす地すべり安定解析における残留強度の工学的重要性が認識され, 残留強度を求めるための室内土質試験として, 大変位を与えるための特殊なせん断試験が研究, 実施されてきたことを述べた。ここで最適な試験方法とされるリングせん断試験は, 試料の適用条件と実務性において必ずしも優れているとはいえず, 繰返し一面せん断試験がこれら条件を満たしていることを述べた。しかし, 繰返し一面せん断試験については, 試験結果に与える影響要因の評価が不十分であり, 得られる残留値の妥当性を検証するためのさらなる検討が必要であることを指摘し, また残留強度に関しては, 概念と定義は明確にされているものの, 最も基本的問題であるその発現機構について未解明のまま残されていることを指摘した。

第2章では, 第三紀層地すべり地におけるすべり面の性状観察とすべり面(層)粘土の各種分析結果に基づき, その形態的特徴とすべり面(層)粘土の鉱物学的・化学的特性を明ら

かにした。本研究において研究対象とした地すべり面に限った主要な結論を以下に示す。

- (1) すべり面を構成する粘土は、せん断帯にある厚さをもって分布する層状の“すべり層粘土”とその中の主変位せん断面を構成する“すべり面粘土”からなることが多く、すべり面粘土は上下粘土層に比べて粘土鉱物の含有量と含水比が高い。
- (2) すべり面粘土には、その上面及び内部に平面状またはラミナ状の鏡肌がしばしば形成されており、このような場合において、そのせん断強度は残留強度またはそれに近い値にまで低下しているとみられる。
- (3) すべり面粘土には、石英とスメクタイト、イライト/スメクタイト混合層鉱物などの膨潤性粘土鉱物が普遍的に含まれており、すべり面粘土の高含水比の一因にこれら膨潤性粘土鉱物の界面電気化学的性質による吸着水層の分布が考えられる。なお、すべり層において石英の含有量が著しく低下する場合、流入粘土の影響を受けているとみられる。

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た。主要な知見を以下に示す。

- (1) 残留状態におけるせん断現象は、せん断面での間隙比が一定のもとで行われる相対運動であり、二面間の接触による摩擦現象と理解される。ゆえに残留状態におけるせん断抵抗係数: $\tan \phi_r$ は、摩擦係数: μ に相当する。
- (2) 粘土の残留状態を想定した場合、せん断面での潤滑状態は水を流体膜とした「流体潤滑」、
「混合潤滑」、
「境界潤滑」のいずれかの状態にあると考えられ、よって発揮されている残留強度も各潤滑状態に応じた3つの摩擦形態に大別される。
- (3) 「流体潤滑」の摩擦の起因である流体膜の粘性は、残留強度がせん断速度に対して対数比例することから非ニュートン粘性であり、その発現機構は絶対反応速度論から導かれるアイリングの粘性理論により説明が可能である。
- (4) 「境界潤滑」の摩擦の起因である固体-流体膜間の相互作用は、結合エネルギー計算から粒子スケールにはたらく相互作用であり、①静電力(電気二重層: 同形置換による永久電荷と端面の変異荷電に起因)、②粒子全体に作用する分子間力(van der Waals力など)、③水和

力の3つの力の作用によると考えられる。

- (5) 「境界潤滑」において、摩擦の一部を担う凝着力は、せん断の過程で表面凸部同士が接近することにより互いの分子間力の引力圏内に入るために起こるもので、ここでは瞬間的な固体間の弱い結合が生じている。

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の影響、上下せん断箱隙間からの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た。さらに試験条件に関わる影響要因としてせん断速度と残留強度との関係について取り上げ、その論理的根拠を明らかにした。主要な結論を以下に示す。

- (1) せん断方向逆転の影響について、SEMによる試験後のせん断面の構造観察から、定圧試験とプレカット定圧試験において主変位せん断面の配向度がほぼ100%であることが確認された。よって、これら試験条件においては残留状態の配向条件(主変位せん断面の完全配向)を満たしており、妥当な残留強度を得ることが出来る。
- (2) せん断面と供試体せん断面間に作用する摩擦力について、せん断箱内に設置した小型ロードセルの測定値から、有効せん断面積減少率10%のときの全せん断力に占める摩擦力の割合は定圧条件で4.9%、定体積条件で1.7%であり、実用上無視できる。
- (3) 上下せん断箱隙間から漏出した試料とせん断箱との間で生じる残留状態における摩擦力は、NSF粘土を用いた定圧条件での繰り返し一面せん断試験結果によると全せん断力の実に約20%を占めている。繰り返し一面せん断試験において試料漏れ対策は不可欠である。
- (4) 残留強度がせん断速度の影響を受けることに関して、ストライバ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、せん断抵抗係数($\tan \phi_r$)がせん断速度の増加に対して増加、不変、減少することを説明できる。

第5章では、前章の検討結果に基づき、繰り返し一面せん断試験機の具備すべき条件を満たす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、本装置より得られた試験結果とその適用例から試験装置の実務上の有効性を確認

した。主要な結論を以下に示す。

(1)「小型自動繰返し一面せん断試験装置」は、粘性土および砂質土のピーク強度、完全軟化強度、残留強度を精度良く測定できるほか、小型・軽量かつコンピュータによる自動計測・制御がなされるなど実用的な試験装置である。本装置の特徴は以下のようである。

- ①せん断箱—供試体せん断面間および試料漏れによる摩擦力をせん断箱内蔵のロードセルにより測定することができる。
- ②すべり面をプレカット面として利用する「含すべり面試験」を行うために、せん断箱側面をアクリルを用いて可視化し、せん断箱底盤を上下に移動できる構造になっている。
- ③垂直力载荷システムに変位制御方式(デジタルサーボモーター)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。

(2)NSF粘土を用いた繰返し一面せん断試験と一方向繰返しせん断試験との残留値の比較では両者はほぼ同じ値をとり、測定値の上からもせん断方向逆転の影響がないことが確認された。

(3)銅山川地すべり面粘土を用いたリングせん断試験との比較では、試料漏れ対策を施した繰返し一面せん断試験の残留値が小さい値を示した。このことは、繰返し一面せん断試験による残留強度が、常にリングせん断試験より大きな残留値を与えるとする既成概念を破るものである。

(4)本装置より求められたせん断強度を用いてMitachiらの方法により実際の地すべり地の設計用パラメータを決定した。求められた平均強度パラメータは、すべり面粘土の不攪乱試料から得られた原位置強度に近似し、装置の実務上の有効性が確認された。

6. 2 今後の展望と課題

粘土の残留強度発現機構に関しては、せん断面での潤滑状態により摩擦形態が「流体摩擦」、「混合摩擦」、「境界摩擦」の3つに大別され、「流体摩擦」における発現機構はアイリングの粘性理論により説明出来ること、「境界摩擦」は、その主因が粒子スケールの固体と流体膜間の相互作用(①静電力、②粒子全体に作用する分子間力、③水和力)であることを整理することができた。しかし、これら固体—流体膜間の作用は複雑に絡み合っていると考えられ、現在、すべてを明確に説明できる理論はない。残された課題は、残留状態における3つの力の作用関係を説明するための連続体理論の構築であり、コロイド科学では、このような拘束下における力を総称して非DLVO力と呼ぶ。非DLVO理論の構築のためのさらなる基礎的実験データの蓄積とそれに基づくモデルの構築が必要である。

繰返し一面せん断試験方法に関しては、試料漏れ対策を施した圧密定圧条件とプレカット供試体を用いた圧密定圧条件に基づいて実施された試験から、残留強度として妥当な値を得ることが出来ることを確認した。一方、圧密定体積条件による試験では、試料漏れによる体積減少のため垂直力の著しい低下がみられた。現状では、せん断箱隙間からの試料漏れ防止が困難なことから、事実上、定体積条件を満たすことは出来ない。よって残された課題は、定体積条件を満たすための新たな試験方法の研究であり、残留状態に至るまでは定圧条件で試験を行いその後載荷板を固定することで疑似的な定体積条件とする、「含すべり面試験」を行う、などが考えられる。含すべり面試験は、実際の地すべり面をプレカット面として利用するため、少ない変位量で残留強度が得られ試料漏れが少なくすむ。今後、集水井などから試料を採取する機会が増え、供試体のセッティング方法をさらに工夫することで、地すべり安定解析に特有の土質試験方法として位置づけられるものと期待される。

記 号 表	
W_L	液性限界(%)
I_p	塑性指数
c_l'	原位置強度に対応する粘着力(kPa)
c_p'	ピーク強度に対応する粘着力(kPa)
c_s'	完全軟化強度に対応する粘着力(kPa)
c_r'	残留状態における見掛けの粘着力(kPa)
ϕ_l'	原位置強度に対応するせん断抵抗角(°)
ϕ_p'	ピーク強度に対応するせん断抵抗角(°)
ϕ_s'	完全軟化強度に対応するせん断抵抗角(°)
ϕ_r'	残留状態における見掛けのせん断抵抗角(°)
τ	せん断応力(kPa)
τ_p	ピーク強度(kPa)
τ_s	完全軟化強度(kPa)
τ_r	残留強度(kPa)
σ_v	垂直応力(kPa)
σ_o	過圧密状態のすべり面に働く有効垂直応力(kPa)
σ_n	正規圧密状態のすべり面に働く有効垂直応力(kPa)
σ_n'	せん断面上の有効垂直応力(kPa)
ε	ひずみ
F_s	安全率
F_o	現状安全率
SF	せん断力(N)
HD	水平変位(mm)
Fr	せん断箱と供試体せん断断面間の摩擦力(N)
F	摩擦力(N)
W	垂直荷重(N)

記 号 表	
μ	摩擦係数
η	粘度(Pa·s)
V	相対速度(mm/min)
Vh	せん断変位速度(mm/min)
P	荷重(Gpa)
h	流体膜の厚さ(m)
R	表面粗さ
M	配向度(%)
α_{modo}	最頻度配向度(°)
δ	せん断面以外のペットの最頻度方向(°)
α	せん断面のベット方向(°)
C	粒子が1秒間にどちらかに移動する回数または個数(比速度)(個/秒)
C_f	1個の流動単位が前方向へ毎秒障壁を通過する回数(個/秒)
C_b	1個の流動単位が後方向へ毎秒障壁を通過する回数(個/秒)
f_*	流動単位に作用するせん断力(N/個)
S	微視的すべり面単位あたりの流動単位数(結合数)(個/cm ²)
E_o	活性化エネルギー(kcal/mol)
k	ボルツマン定数(1.3808×10^{-16} erg/degree)
h	プランク定数(6.626×10^{-27} erg·s)
T	絶対温度(K)
Z_*, Z	流動単位の分配関数
QI	石英指数
I_m	最強X線強度(CPS)
I_p	X線強度(CPS)

謝 辞

本論文が完成するまで、多くの人々にご指導とご支援をいただきました。

北海道大学大学院の三田地利之教授には、論文全体にわたり数多くの適切なご指導とご助言をいただきました。論文作成中は、著者の怠慢によりしばしば原稿が遅れ、先生にはご忍耐とご迷惑をおかけしました。私にとって、先生のような偉大な人物に出会うことができたことは幸せであり、研究者としてのスタートラインに立たせていただいたことを心から感謝いたしております。

同大学院の三浦清一教授には、論文全体に対して適切なご助言とご鞭撻をいただきました。とくに、用語の使い方、試験内容などについて説明不足なところを的確にご指示いただき文章のながれを良くしていただきました。同大学院の金子勝比古教授には、岩石力学の視点からメゾメカニクスの重要性と”ものに対して正直であれ”との教えをいただきました。土の挙動を解明していくために何が必要か、また研究に対する姿勢において貴重な教訓を与えていただきました。同大学院の米田哲朗助教授には、著者が大学院に入学したときから公私ともども面倒を見ていただいております。第2章は主として先生との共同研究によるものです。先生の研究に対する厳しい姿勢など、これからも多くのものを学び取らなければと思っております。

京都大学防災研究所の千木良雅弘教授には、長崎豪雨の崩壊地調査に同行させていただきました。8月の猛暑のなか先生についていくのがやっとでした。応用地質学の第一人者の傍らで自分がいかに中途半端な人間であるか思い知らされた貴重な体験でした。岩手大学の多田元彦助教授には、著者を研究者の道へ導いていただきました。北海道大学大学院の地盤工学講座の方々には、長年にわたる試験装置の製作と実験に際して、数々のご協力をいただきました。

国土防災技術株式会社の山崎孝成博士、真弓孝之氏には、「含すべり面試験」の試験方法について、試料の採取方法をはじめとしてその詳細を教えてくださいました。基礎地盤コンサルタンツ株式会社の平田晴昭氏には、地すべり面粘土をいただいたほか実務における地すべり調査についていろいろと教えてくださいました。奥山ボーリング株式会社の阿

部真郎氏には、東北地方の地すべり面粘土をいただきました。株式会社シーウェイエンジニアリングの佐野彰博士には、繰返し一面せん断試験の試験方法ならびに同氏が開発に携わった「軟岩用自動繰返し一面せん断試験装置」の改良にご協力いただきました。株式会社ジャコムの増井明典氏には、「小型自動繰返し一面せん断試験装置」の設計・製作にあたり、ご協力をいただきました。

地すべり学会東北支部の盛合禧夫支部長、宮城豊彦副支部長、千葉則行事務局長には、著者が地すべり研究を行う上で、現場見学会、討論会、研究委員会など、様々な機会を与えていただきました。また同支部の「企画・実行委員会」ならびに「地すべり安定解析用強度決定法委員会」のメンバーには、地すべり全般に対して活発な議論をいただきました。

岩手県北本内ダム建設事務所（現在 岩手県企画振興部資源エネルギー課）の中澤昭典課長補佐には、岩手県明倉沢地すべり地、コシタキ沢地すべり地の調査の機会を与えていただきました。

そして、著者が所属する防災地盤工学研究室の大学院修了生、学部卒業生、在学生の諸氏には試験の実施、結果の整理、図表作成などを協力してもらい、とくに棚田真氏（現在 寒河江測量設計事務所）には第3章について、在学生の佐藤、菅原、辻、早川、矢作の5名には各章の図表作成に協力してもらいました。

これら多くの方々に心からの謝意を表します。

最後に、論文のことをいつも心配してしてくれた母と妹 祐子、いつもそばで様々なことのあった著者に”元気”を与え続けてくれた 妻 真紀子、可愛いいしぐさで心を和ませてくれた 娘 あみ に心から感謝して謝辞とします。

