

写真2 ICパッケージ三連の傾斜計



写真4 地盤作成の様子

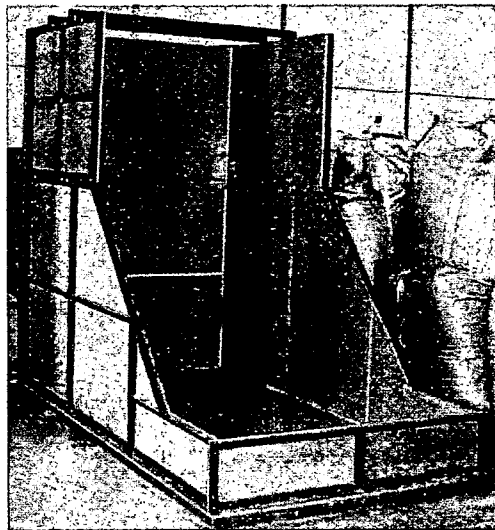


写真3 実験用土槽

表2 実験ケース

| ケース | 1 | 2 | 3 | |
|------------------------------|------|---------------|------|------|
| 乾燥密度 (g/cm ³) | 1.44 | 1.43~ 1.47 | 1.51 | |
| 含水比 (%) | 8.05 | 6.2~ 8.9 | 7.3 | |
| 斜面勾配 (度) | 60 | 60 | 60 | |
| ロッドの 埋込み深さ (cm) | 斜面 | 15 | 15 | 3連30 |
| | 法肩 | 5 | 5 | 3連30 |

2) 高精度傾斜計の構造

室内模型実験の際には、写真1に示すような中空アルミ棒(外径7mm, 肉厚0.5mm)の上にICパッケージタイプのセンサーエレメントをX, Y方向の傾斜が計測できるように取付けたものを用いた。さらに、斜面内部の変化を捉えるため、厚さ1.0mmのアクリル板に3個の傾斜計(センサーエレメント)を150mmずつ離して取り付けた3連の傾斜計を作成し(写真2参照、以下、3連傾斜計)、地盤内に挿入にして計測を行った。なお、3連傾斜計については、計測器の都合上、X方向の傾斜のみ測定することとした。

上述のような高精度傾斜計を室内模型実験に用いて、斜面崩壊の前兆現象等の確認を行った。

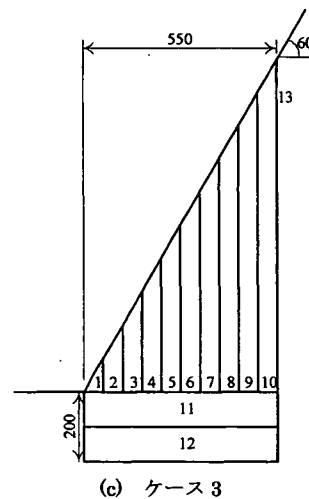
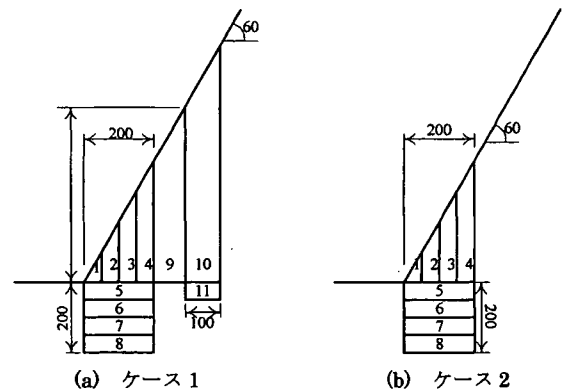


図4 掘削パターン

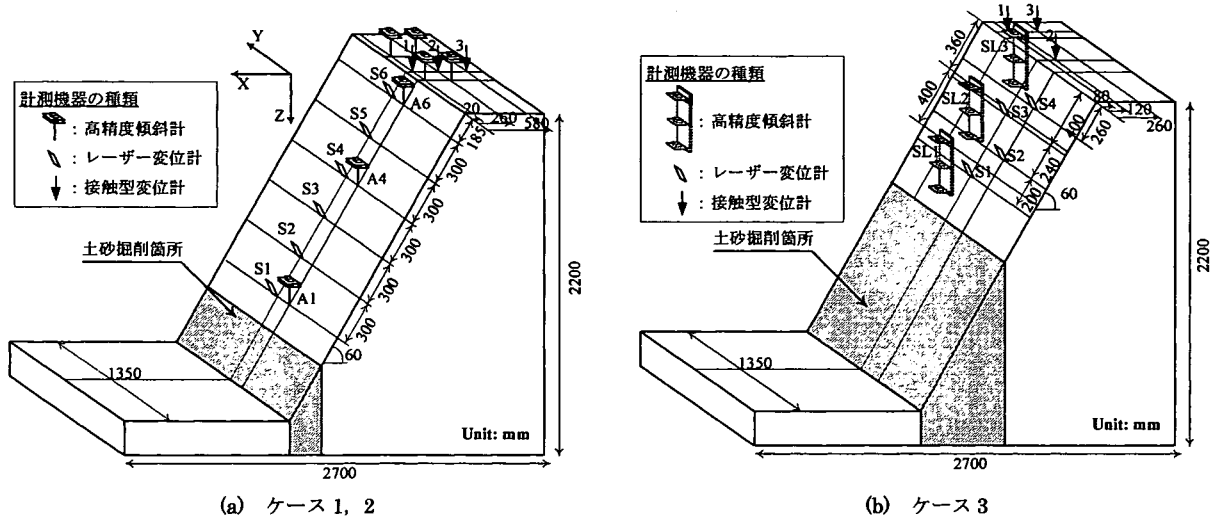


図5 計測器配置状況

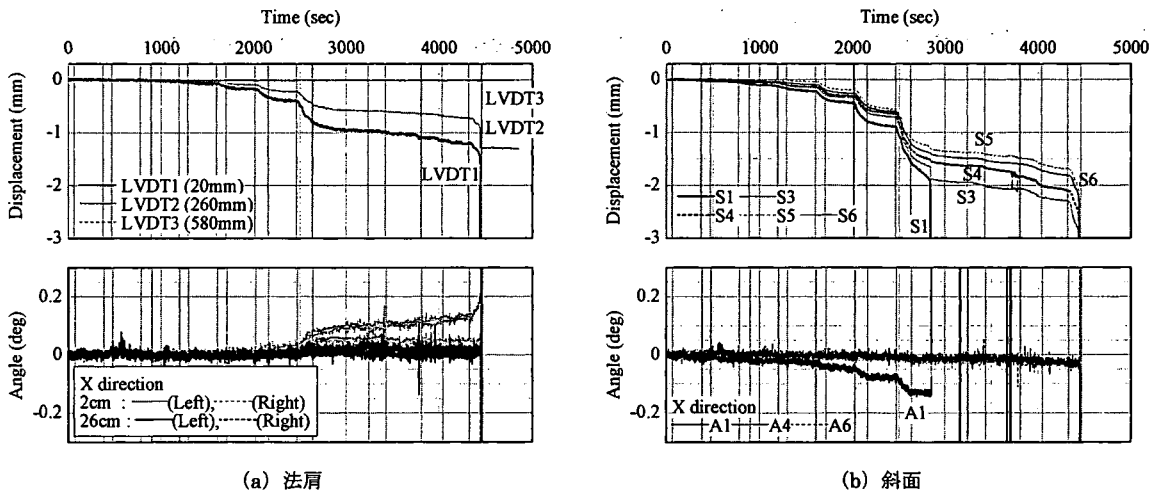


図6 ケース1の計測結果

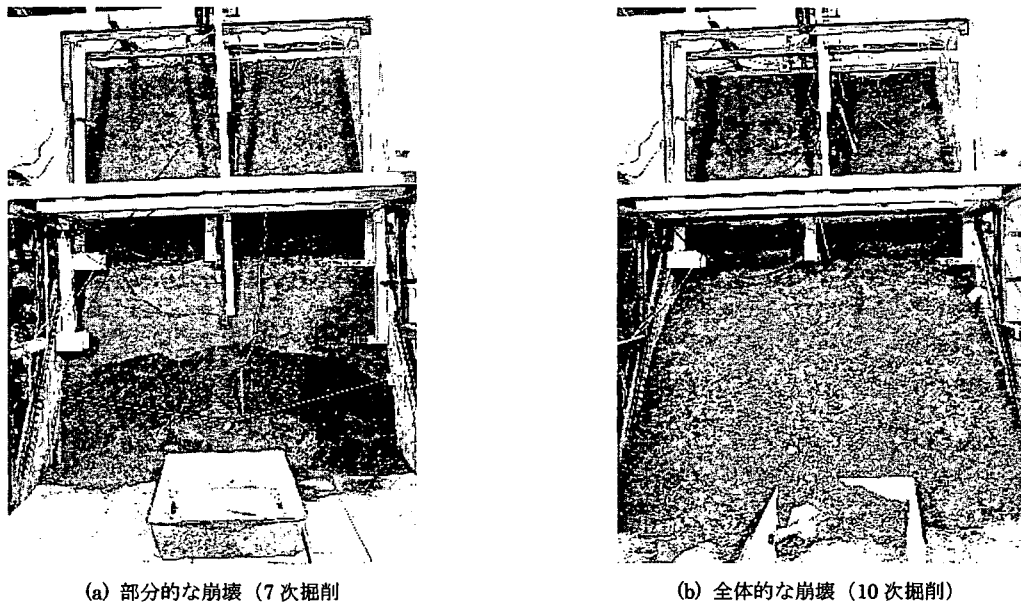
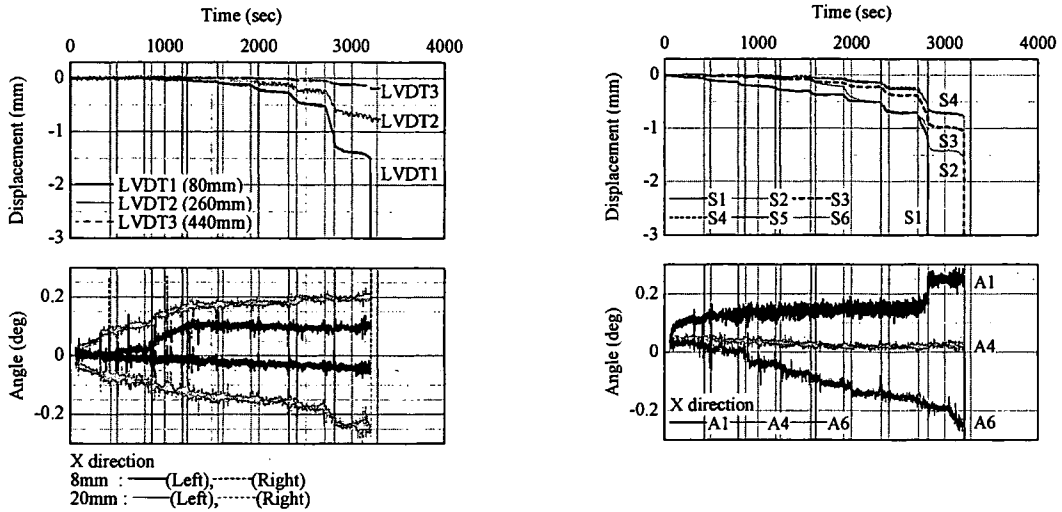


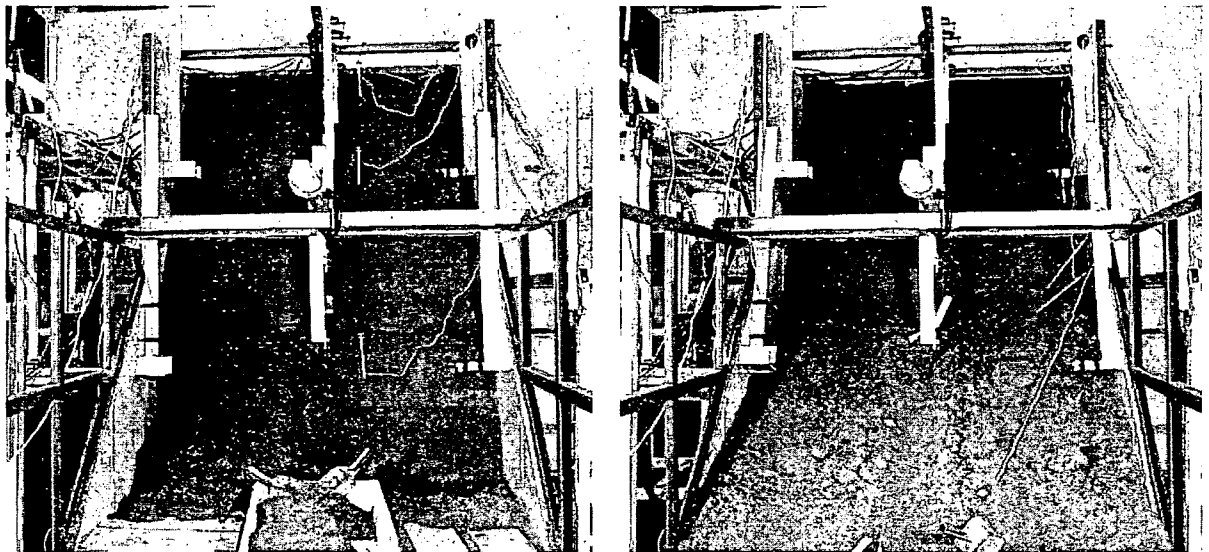
写真5 ケース1の崩壊状況



(a) 法肩

(b) 斜面

図7 ケース2の計測結果



(a) 左側のみ崩壊

(b) 全体的な崩壊

写真6 ケース2の崩壊状況

3 室内模型斜面での斜面崩壊実験

1) 実験概要

(独) 労働安全衛生総合研究所内の多目的大型実験室内に写真3に示すようなL字アングルとコンパネによる実験用土槽(幅1.35m, 奥行き2.7m, 高さ2.2m)を作成した。この土槽内部に模型斜面を作成し, その下部を掘削して斜面を不安定化させて崩壊に至る斜面崩壊実験を行い, 高精度傾斜計の性能等について検証した。

実験に使用した試料は川砂(単位体積重量 2.76kN/m^3 , 地盤区分SP-G, 礫分(2-75mm)8.8%, 砂分(0.075-2mm)8.8%, 細粒分(75mm未満)2.1%, $D_{50}=0.453$)である。地盤は川砂を写真4のように層毎に突き棒により突き固めることにより作成した。本実験は, 表2に示すように, 乾燥密度, 含水比, 傾斜計のロッドの埋込み深さおよび高精度傾斜計の埋設深さを变化させた全3ケ

ースである。掘削過程は, 図4に示すように各ケースで異なっている。これは, 崩壊直前の前兆を把握するために計測値が安定するまで放置するなど, 実験によって臨機応変に対応したことなどによる。

計測機器の配置状況を図5に示す。ケース1, ケース2では高精度傾斜計を斜面上に3点, 法肩部に4点設置した。ケース3では3連傾斜計を斜面上に2点(SL1, SL2), 法肩部に1点(SL3)設置した。なお, 高精度傾斜計が設置してあるほぼ同じ箇所には, レーザー変位計(KEYENCE社製LB-01)も設置し, 変位挙動を計測している。さらに, 接触型変位計(東京測器研究所社製CDP-50)を法肩部に設置し, 沈下量の測定を行った。以下の計測結果に示すX方向, Y方向の出力は図5に示した座標系に従って記述したものである。

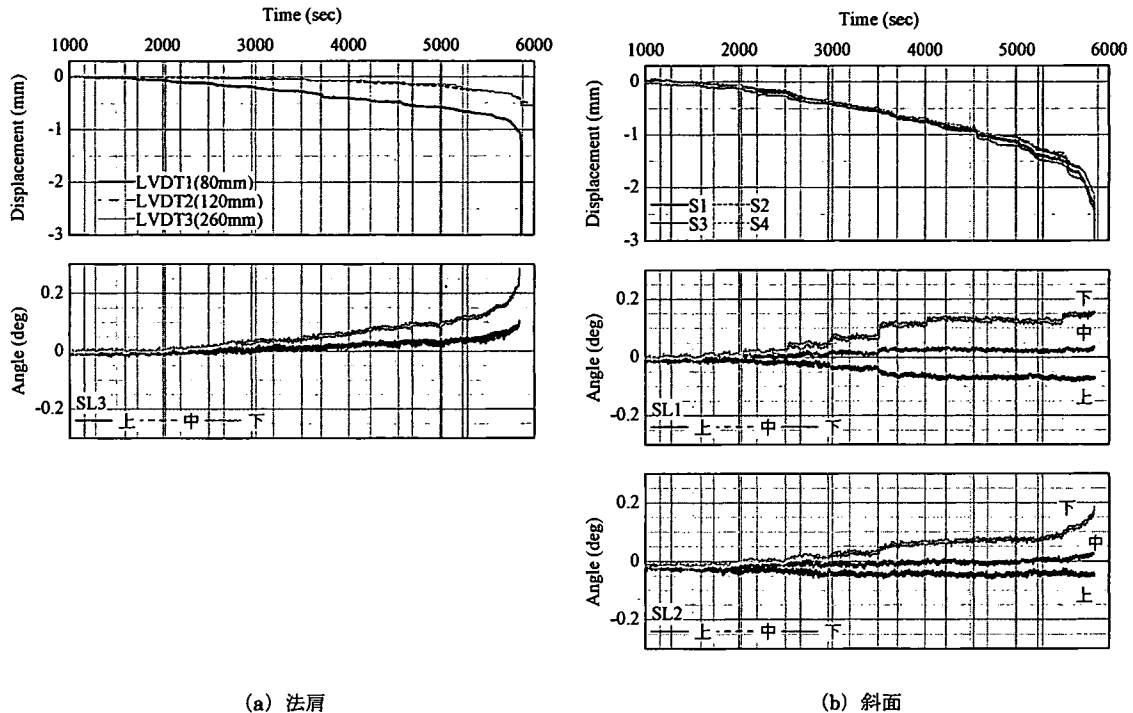


図8 ケース3の計測結果

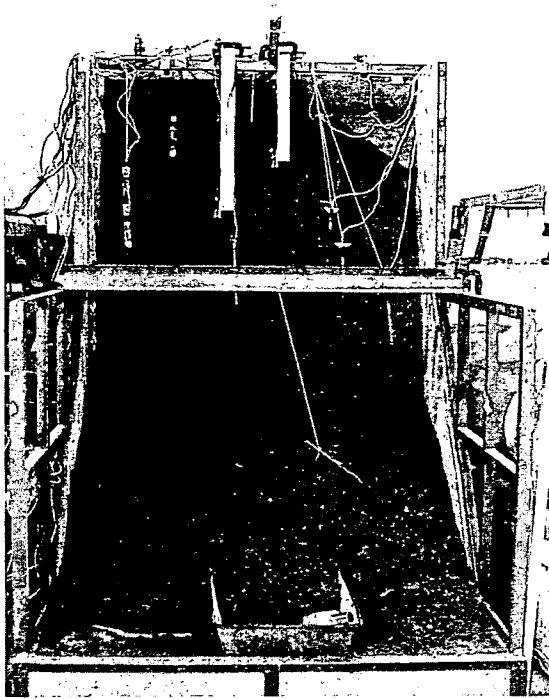


写真7 ケース3の崩壊状況

2) 実験結果と考察

各ケースにおける計測箇所の変位と傾斜角度について法肩と斜面での計測結果を図6~8に、崩壊状況を写真5~7にそれぞれ示す。

ケース1では部分的な崩壊(斜面内崩壊)と全体的な崩壊の2回の斜面崩壊が発生した(写真5)。1回目の崩壊は、7次掘削にて掘削が終了しているにもかかわらず

変形が収束せずに掘削終了から210秒後に斜面内崩壊(写真5(a))が発生した。その後、10次掘削中に全体的な斜面崩壊(写真5(b))が発生した。計測結果を図6に示す。変位計の結果から、掘削する各段階において微小ながら変形し、3mm程度以内の微小な変位量にて崩壊に至っていることが分かる。高精度傾斜計の結果についても、掘削に伴い0.1度オーダーの微小な変形が計測されている。特に斜面に設置された傾斜計A1(最も掘削面に近い箇所にある高精度傾斜計)の挙動は、変位計の結果と良く対応している。傾斜計A1はX方向がマイナス側に移動していることから、斜面側に倒れるような挙動を呈していたことが分かる。また、掘削面から離れている傾斜計A4、A6では、全体的な斜面崩壊に至る10次掘削まで緩やかな傾きで変動している。高精度傾斜計のY方向の計測結果では、その変動はほとんど見られない。これは、2次元的な崩壊を意味しており、崩壊状況とも一致する結果である。全体的な崩壊の前兆現象については、法肩部の高精度傾斜計の計測結果が明確に示している。この結果から、斜面崩壊の前兆現象を的確に把握するには、計測機器を適切な位置に設置することが重要であると指摘できる。

ケース2の崩壊状況を写真6に示す。ケース2でもケース1と同様に2回の崩壊が発生した。しかしながら、1回目の崩壊は左側斜面だけの局所的な崩壊(写真6(a))であり、ケース1の1回目の崩壊挙動とは異なる挙動を示した。計測結果を図7に示す。掘削開始直後からY方向の傾きが法肩、斜面ともに現れている様子が分かる。これは、局所的に崩壊する状況を表しているものと言える。実験後に行った含水比・乾燥密度から左右で若干の

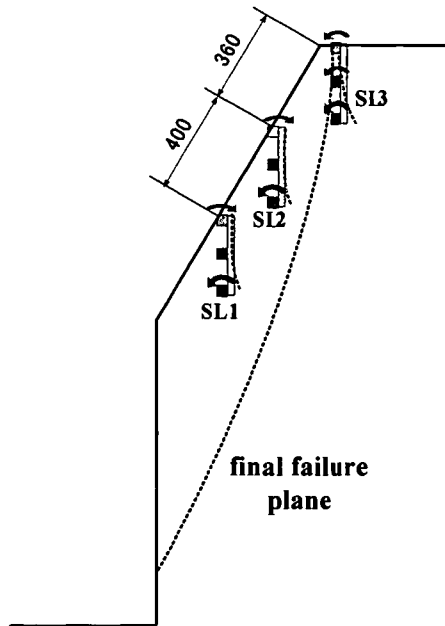


図9 ケース3の三連傾斜計の傾き状況の模式図

バラツキが見られており、崩壊挙動にも多少なりとも影響を与えたものと思われる。斜面に設置された掘削面に最も近い傾斜計 A1 では、X・Y 方向ともにプラス側に変動しており、崩壊した斜面左側に倒れるような挙動を示している。また、斜面上方に設置した傾斜計 A6 では X・Y 方向ともにマイナス側に変動しており、斜面側に倒れるような挙動と一致している。また、斜面中間に設置した傾斜計 A4 では、X・Y 方向ともほとんど変化がなかった。ケース 1 とケース 2 では、掘削面近傍にある傾斜計 A1 の挙動が全く逆の動きをしている。ケース 1 では崩壊した土塊上に傾斜計が設置されていたのに対し、ケース 2 では傾斜計が崩壊土塊に含まれていなかったといったことが影響しているものと推察される。

ケース 3 の崩壊状況を写真 7 に示す。ケース 3 は他のケースより下層が密に締まっていたことから、崩壊まで掘削量が大きくなった。計測結果を図 8 に示す。図 8 (a) は法肩に設置した変位計 (LVDT) と 3 連傾斜計 SL3、図 8 (b) はレーザー変位計による斜面表面の変位と斜面内に設置した 3 連傾斜計 SL1 と SL2 の値である。掘削毎に法尻付近の下部の傾斜計 (SL1・下) が段階的に増加し、その後、斜面中部の SL2・下が反応した後、法肩に設置した SL3・下に大きな応答が見られた。これは、下部の掘削によって斜面内の応力分布が変化しせん断ひずみ発生箇所が変化しているものと推察される。図 9 は、それぞれの傾斜計の値から SL1、SL1、SL3 の 3 連傾斜計がどのように傾いたかを模式的に示したものである。すべり面近くの傾斜計が大きく反応していることがわかる。掘削により斜面形状が変化するとともに斜面内の地盤のひずみ分布が変化することと関連していると思われる。測定箇所の選定に当たって考慮すべきである。

以上、ケース 1 からケース 3 の結果から、斜面崩壊に至るまでに、微少ながら斜面が変形していることが明確となった。崩壊前の法肩の沈下、斜面の変位は 3mm 程度以内であったが、この変化を捉えることで崩壊の予測は可能であるといえる。また、0~0.2 度程度を高精度に測定できる傾斜計は崩壊予知に有効である可能性が高いことがわかった。

高精度傾斜計は単体で計測可能であり、単に地盤に差し込めばいいことから、設置に関して専門技術が不要という特徴がある。また、センサー一個が比較的廉価であることから、多数の設置が容易であり、崩壊部を確実に捉えるために崩壊による災害の可能性のある箇所に面的な広がりを持って配置するなど、高精度傾斜計の特徴を生かした配置を考慮することができる。

なお、小規模で急角度の砂地盤において崩壊予知が出来たことから、崩壊までに変形がより大きい粘性土でも崩壊前の変位を捉えることが可能と考えられる。

4 計測機器の活用について

1) 安全施工における計測機器の位置付け

斜面崩壊による労働災害を防止するには、計画の段階から設計・施工まで全体を通して包括的な見直しを行い、全施工工程を安全な状態とすることが必要である。そのためには、①作業員が危険な状況とならないような安全な施工方法を採用することが必要である。その際には、②切り取り斜面下で行う各種作業の見直し、③施工途上の斜面安定性の検討 (土留めなど抗土圧構造物の設置を含む) が不可欠である。さらには、長大斜面などで、どこから崩壊が発生するか予測がつかない場合を始めとして、地盤・抗土圧構造物の不確定要素が残存する場合など、上記対策を補完するものとして、④計測施工が重要と考えられる。

すなわち、計測施工は、切土掘削工事を安全とするために重要であるが、計測施工さえやっていたら他は何もしなくてもいいというものではなく「安全施工」とするための補完的な位置付けとなると考える。

また、当該実験から、すべり面付近など変化が現れ易い場所があり、計測機器の設置位置で感度が異なることがわかった。崩壊の前兆を確実に捉えるためには崩壊の可能性のあるところを網羅するように計器を配置することが重要である。

2) 判断基準について

上述したように崩壊前の地盤変位、傾斜角変化は、当該実験では 3mm 程度、0.2 度程度であった。このような微少な変化を捉えるには目視による監視だけでは到底不可能である。計測機器による客観的なデータに基づく判断が必要であると言える。

次に、得られた値をどう判断するかという閾値 (判断基準) の問題がある。地盤の種類やその現場の地層状態に崩壊メカニズムは大きく影響される。崩壊メカニズムによって閾値 (判断基準) も変わってくると考えられることから一律に確定的な値を示すことは難しい。しかし

ながら、安定している地盤は動かないことから、計測値に変化が現れたら注意して計測値の時間経過を追うことが必要である。計測値の変化が止まらない場合や変化の度合い（微分値）が変わる場合は要注意である。その場合は、施工方法の再検討などが必要であり、発注者との協議も必要となる。急激な変化が現れた場合は、崩壊直前のおそれがあるので緊急に避難すべきである。

5 おわりに

本研究では、低コストで高精度な動態観測システムとして半導体型加速度センサーを利用した高精度傾斜計を斜面崩壊の動態観測・崩壊予知への適用可能性について検討を行った。その結果、労働災害が発生しやすい小規模な崩壊においても、精度良く計測ができ、崩壊直前の前兆現象を捉えることが出来ることを確認した。具体的な結論は、以下のとおりである。

- 1) 川砂で作成した高さ 2.2m の模型斜面において、法尻掘削によって崩壊に至るまでの地盤変位、傾斜角を計測した結果、崩壊前に地盤変位が生じるとともに傾斜角が変化していることが明らかとなった。当該実験では 0~3mm 程度の変位、0~0.2 度程度を高精度に測定できる変位計、傾斜計は崩壊の予知に有効である。
- 2) 高精度傾斜計は単体で計測可能であり、単に地盤に差し込めばいいことから、設置に関して専門技術が不要という特徴がある。また、センサー一個が比較的廉価であることから、多数の設置が容易であり、崩壊部を確実に捉えるために崩壊による災害の可能性のある箇所にも面的な広がりを持った配置が可能である。高精度傾斜計のメリットを生かした配置を考慮する必要がある。
- 3) 斜面の法尻掘削とともに斜面表面、内部各点の傾斜計の反応も変化している傾向が見られた。掘削による斜

面形状の変化に伴い、斜面内における地盤のひずみ分布の変化と関連している。

- 4) 傾斜計は、すべり面となる可能性のある近辺の地盤内に埋設することにより高感度の予測が可能になることが分かった。計測機器の差込みロッドの挿入量を深くするなど、測定箇所を選定・設置に当たって考慮すべきである。

謝 辞

本研究の一部は、厚生労働省科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業 課題番号 H17-労働一般-016、代表研究者：三田地利之）の補助を得て実施したものである。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 例えば、建設業災害防止協会：平成 17 年度版建設業安全衛生年鑑、建設業災害防止協会、212p、2005。
- 2) 伊藤和也、豊澤康男、Tamrakar S. B., 堀井宣幸：建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析、日本地すべり学会誌、Vol. 41, No. 6, pp. 17-26, 2005。
- 3) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., 1969。
- 4) 切土法面の調査・設計から施工まで編集委員会編：地盤工学・実務シリーズ 5 切土法面の調査・設計から施工まで、476p, 1998。
- 5) 地盤技術者のための情報化設計・施工入門編集委員会編：入門シリーズ 26 地盤技術者のための情報化設計・施工入門、162p, 2000。
- 6) 国見敬、納谷六郎、堀井直彦：車両運動制御用高性能加速度センサの開発、自動車技術、Vol.55, No.10, pp. 48-53, 2001。

Prediction of Slope Failure Using Highly Accurate Tilt Sensors

by

Yasuo TOYOSAWA*1, Kazuya ITOH*1, Surendra B. TAMRAKAR *2 Toshiyuki MITACHI *2
Takashi KUNIMI*3, Atsushi NISHIJYOH*3 and Satomi OHKUBO *3

This paper presents the application of tilt sensors to measure the movements of a slope surface and slope crest just before failure during excavation of the lower parts of the slope. The tilt sensors used here consisted of highly sensitive and accurate accelerometers, which could measure tilt angles along the XY directions. Full-scale model slopes were prepared using river sand in the laboratory; the slopes were excavated from the lower parts (toe excavations) until slope failure occurred. A gradual increment in tilt angle during the excavation and rapid increment just before slope failure were observed by the tilt sensors, verifying the applicability and efficiency of using tilt sensors to predict slope movement in actual excavation sites.

Key Words: slope failure, tilt sensor, failure prediction, labor accident, physical modeling

*1 Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan

*2 Faculty of Engineering, Hokkaido University

*3 Akebono Brake Industry Co., Ltd

繰り返し一面せん断による地すべり対策工設計用強度パラメータ決定法の適用例

北海道大学大学院 学生会員 ○鷺 隼人
 北海道大学大学院 国際会員 三田地 利之
 ドーコン 正会員 高橋 秀彰
 北海道大学 学生会員 梅谷 晋平

1. はじめに

サンプリング時の乱れの影響やせん断試験機の性能に対する信頼性の問題から、試験結果の妥当性が疑問視されていたこと、強度定数が試料の採取位置によってばらつくものと認識されてきたこと¹⁾、設計指針類に室内せん断試験結果を用いるように規定されていないことなどから、 $c'_0 = d(c'_0)$: 地すべり面上で発揮されると想定される粘着力(kN/m²)、 d : 地すべり土塊の最大層厚(m)とする仮定を併用した逆算法(以下 $c=d$ 法)を用いることが地すべり対策工設計のルーチンワークとなっている。しかし、近年の技術進歩と試験基準の整備²⁾によって事情は変わっており、また室内試験結果を取り入れた地すべり対策工設計用の強度パラメータ決定法も提案されている³⁾。筆者らは室内試験結果を逆算法と結びつけた強度パラメータの決定法(method for determining design Strength Parameters by Laboratory test and Inverse Calculation Engagement(以下 SPLICE 法と略記)⁴⁾を提案しており(図1)、これまで3カ所の地すべり現場について適用例を示してきた⁴⁾。

今回サンプリングから室内せん断試験までの一連の作業に関わる機会に恵まれ、2カ所の地すべり現場のすべり面粘土を入手することができた。本研究では、繰り返し一面せん断試験結果から各種状態強度パラメータを決定し、SPLICE 法の適用結果を示す。また残留状態強度パラメータが不攪乱試料と再構成試料で一致しない原因について、粘土含有量やすべり面付近の含有鉱物およびスメクタイト含有量の観点からアプローチする。

2. 地すべり概要

本研究では、夕張市富野地区の2つの地すべりブロック(A,B)を対象としている。調査地には古第三紀の泥岩(幌内層)が分布し、多数の地すべりが存在する。

A地すべりは、最大幅90m、最大延長120m、最大深さ16mの風化岩地すべりである。すべり面の上位は強風化泥岩からなり、土砂化した部分とやや軟質化した岩片状部が混在している。すべり面直下50cm~2m程度は破碎された岩盤からなり、徐々に良好な岩盤へ変化していく。すべり面付近には概ね厚さ5mm~20cmの粘土層が存在し、鏡肌が確認できる。試料採取位置においても5mm程度のすべり面粘土が存在する。集水井近傍の計測孔における計測結果によると、孔内水位は深度4.8~6.0mの間で変動することがわかっている。すべり面付近を模式化したものを図2に示す。

B地すべりは最大幅120m、最大延長230m、最大深さ28mの風化岩地すべりである。すべり面の上位は主に風化泥岩からなり、土砂化した部分と亀裂質な岩片状部が混在している。A地すべりと比較して、すべり面付近の粘土層は厚く、概ね厚さ10cm~50cm程度である。B地すべりにおいても鏡肌を確認でき、試料採取位置においても5mm程度のすべり面粘土が存在する。集水井近傍の計測孔における計測

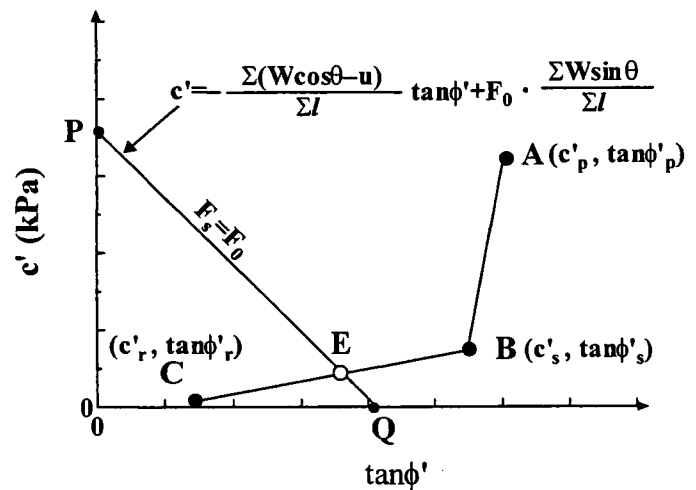


図1 SPLICE 法

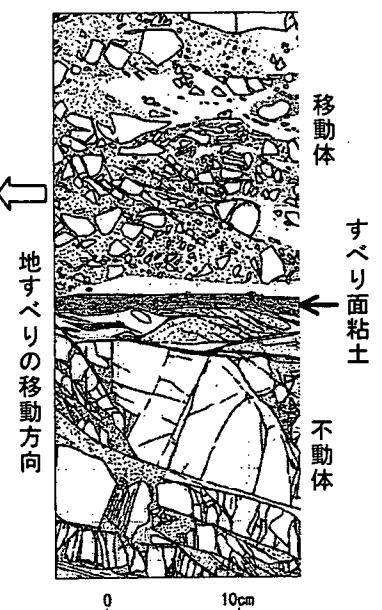


図2 すべり面付近の模式図

Case study of determination of design parameters for slope stability analysis by reversal direct box shear test

Hayato Washi(Graduate Student, Hokkaido University), Toshiyuki Mitachi(Graduate School of Engineering, Hokkaido University), Hideaki Takahashi(Docon), Shinpei Umetani(Under Graduate Student, Hokkaido University)

表1 試料の物性値と残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r

| 試料名 | A地すべり | | | | B地すべり | | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------|-------|------|------------------|--------------------|--------------------|------|
| | 不攪乱試料 | | 再構成試料 | | 不攪乱試料 | | 再構成試料 | |
| | すべり面付近 (約2cm) | すべり面付近 (約5cm) | 再構成 | スラリー | すべり面付近 (約2cm) | すべり面上部 (約2~7cm) | すべり面下部 (約2~7cm) | 再構成 |
| 含水比 w_0 (%) | 20.0 | 13.6 | 30.0 | — | 16.9 | 17.1 | 13.6 | 27.5 |
| 液性限界 w_L (%) | 49.3 | | | | 63.1 | 47.8 | 46.4 | 63.1 |
| 塑性指数 I_p | 31.9 | | | | 46.1 | 34.3 | 33.6 | 46.1 |
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.72 | | | | 2.67 | 2.7 | 2.7 | 2.67 |
| 礫分(%) 2mm以上 | 2.4 | 8.6 | — | — | 5.5 | 7.0 | 32.7 | — |
| 粗砂分(%) 0.425~2mm | 0.6 | 1.0 | — | — | 8.5 | 6.3 | 1.0 | — |
| 細砂・中砂分(%) 0.075~0.425mm | 3.4 | 5.0 | 13.0 | — | 10.6 | 19.9 | 15.0 | — |
| シルト分(%) 0.005~0.075mm | 1.4 | 43.1 | 3.0 | — | 25.6 | 23.1 | 16.4 | — |
| 粘土分(%) 0.005mm以下 | 92.2 | 42.3 | 84.0 | — | 50.0 | 45.2 | 34.9 | — |
| スメクタイト含有量 | 16.8 | — | 18.2 | 18.5 | 24.2 | — | — | 16.8 |
| 残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r (°) | 11.1 | — | 22.1 | 17.0 | 6.7 | — | — | 22.4 |

結果によると、孔内水位は深度 11.2~15.9m の間で変動することがわかっている。

A, B 地すべりにおけるパイプ歪計による計測結果から、地下水位上昇時に顕著な動きが観測されている。今回地すべり対策工として行われた集水井の施工時に、集水井をすべり面以下まで掘り下げることによってすべり面を確認後、一連の試料採取を実施した。その方法はすべり面を含む 1 辺約 30cm の立方体ブロックを切り出したブロックサンプリングとトリプルサンプリングの 2 通りである。採取された試料の物性値と残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r をまとめたものを表 1 に示す。

3. 試験条件

3.1 繰り返し一面せん断試験

試験には本研究室で開発した繰り返し一面せん断試験機⁵⁾を用いた。両面排水条件下で圧密後、定圧繰り返し一面せん断試験を行った。試験条件は、片振幅 6mm、せん断繰り返し回数 10 回 (A 地すべりでは 5 回)、上下せん断箱間隔は 0.2mm、せん断速度は繰り返し回数の初回、最終回は 0.02mm/min、途中のせん断では 1.0mm/min とした。なお供試体は直径 60mm、高さ 20mm (再構成試料は 30mm) の円盤状に成型したものをを用いた。供試体の成型時においてブロックサンプリング試料 (以下 BS 試料)、トリプルサンプリング試料 (以下 TS 試料) の一部ですべり面およびすべり方向を確認後、すべり面をせん断箱のせん断面に一致させる事、せん断試験の初期せん断方向を原位置のすべり方向に一致させる事に注意した。再構成試料については不攪乱試料のすべり面付近 (すべり面を含む約 5cm の厚さ) の粘土および軟岩を蒸留水に溶かした後 425 μ m フルイを通過したものを予圧密して作製した。また鏡肌を呈した部分を 2, 3mm 削ったものを蒸留水に溶かした後、425 μ m フルイを通過させたスラリー試料を直接繰り返し一面せん断試験機に流し込み、3 日間圧密した後通常の繰り返し一面せん断試験を行った。通常の繰り返しせん断後、幾つかにおいて (B 地すべりにおいては全ての試料について) は多段載荷せん断試験⁶⁾ (垂直応力 $\sigma'_v=400 \rightarrow 300 \rightarrow 200$ kPa) を行った。

3.2 X線回折試験およびスメクタイトの定量分析

今回 X 線回折用試料として 2 タイプ用意した。まず鉄製乳鉢とメノウ乳鉢で粉碎し、蒸留水中で約 20 分間超音波分散させ、2 μ m 以下の粘土分のみが含まれる懸濁液を 3000rpm の回転速度で 15 分間以上の遠心分離を行い、上澄み液を除いた後少量の蒸留水を加えて高濃度粘土分懸濁液とし、注射器を用いてスライドガラス上に拡げ、風乾したものを未処理定方位試料 (以下 UT 試料と略記) とした。次に UT 試料をエチレングリコールと共にデシケートに入れ、60 $^{\circ}$ C の恒温槽内で 4 時間以上置き、粘土分にエチレングリコール蒸気を十分にさらして飽和处理を行い、得られた試料をエチレングリコール飽和处理定方位試料 (以下 EG 試料と略記) とした。試験は、A 地すべりの①すべり面上 20cm、②すべり面、③すべり面下約 20cm、④すべり面下約 50cm 破碎部について行った。

またスメクタイト含有量はメチレンブルー吸着法により定量分析を行った。

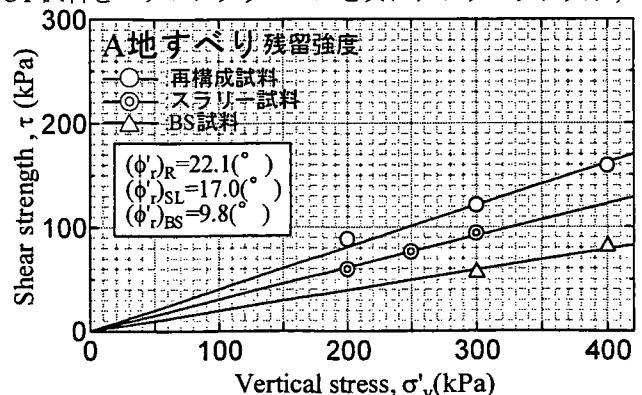


図3 残留強度-垂直応力関係

4. 各種状態強度パラメータの決定について

4.1 A地すべり

A地すべりにおける残留強度-垂直応力関係を図3に示す。BS試料において残留強度が明確に異なる2つのグループに分かれたが、残留強度(△印)が低く分布したBS試料の残留強度より残留状態強度パラメータを評価し、 $(c'_r)_{BS}=0(\text{kPa})$ 、 $(\phi'_r)_{BS}=11.1(^{\circ})$ とした⁷⁾。一方、再構成試料(○印)における残留状態強度パラメータは $(c'_r)_R=0.0(\text{kPa})$ 、 $(\phi'_r)_R=22.1(^{\circ})$ である。次にピーク強度-垂直応力関係を図4に示す。BS試料のピーク強度よりピーク状態強度パラメータを $c'_p=25.9(\text{kPa})$ 、 $\phi'_p=9.4(^{\circ})$ 、再構成試料の完全軟化強度より完全軟化状態強度パラメータを $c'_s=2.6(\text{kPa})$ 、 $\phi'_s=23.9(^{\circ})$ とした。

4.2 B地すべり

B地すべりにおける残留強度-垂直応力関係を図5に示す。またピーク強度-垂直応力関係を図6に示す。多段荷せん断試験の結果、BS試料(△印)において7試料のうち1試料にて残留強度が異常に大きく測定された。残留強度が一致した6試料(破線)はすべり面でせん断され、1試料はすべり面の上部または下部でせん断されたと判断した。これより6試料中から各垂直応力において残留強度が最も低く表れた試料をそれぞれ1つ選び、それらについての試験結果から残留状態強度パラメータ、ピーク状態強度パラメータを評価した(図7)。これより残留状態強度パラメータを $(c'_r)_{BS}=12.8(\text{kPa})$ 、 $(\phi'_r)_{BS}=6.7(^{\circ})$ 、ピーク状態強度パラメータを $c'_p=25.9(\text{kPa})$ 、 $\phi'_p=11.4(^{\circ})$ とした。また図5、6より再構成試料の残留状態強度パラメータを $(c'_r)_R=6.4(\text{kPa})$ 、 $(\phi'_r)_R=22.4(^{\circ})$ 、完全軟化状態強度パラメータを $c'_s=8.0(\text{kPa})$ 、 $\phi'_s=24.7(^{\circ})$ とした。

5. SPLICE法の適用

5.1 A地すべり

A地すべりにおける $c'-\tan\phi'$ 関係を図8に示す。地すべり現場の計測等によって得られた諸数値をFellenius法による円弧すべりの安全率の式 $F_s=(c' \cdot \Sigma l + \tan\phi' \cdot \Sigma(W \cos\theta - ul)) / \Sigma(W \sin\theta)$ に代入することにより、現状安全率 $F_s=1.0$ における直線式は $c' = -140 \tan\phi' + 39$ で表される。これに $c=d$ 法を適用すると $(c', \phi')=(15.0(\text{kPa}), 9.8(^{\circ}))$ となり、SPLICE法による強度パラメータが $(c', \phi')=(14.0(\text{kPa}), 10.2(^{\circ}))$ とほぼ近い値をとった。

本実験から得られた各種状態強度パラメータを仮にそのまま適用したら、どの程度の安全率になるかと計算してみると以下ようになる。不攪乱試料の残留状態強度パラメータでは $F_s=0.7$ 、ピーク状態強度パラメータでは $F_s=1.3$ となる。安全率の $F_s=1.0$ とSPLICE法との交点が不攪乱試料のピーク状態強度パラメータと残留状態強度パラメータを結んだ直線の中に位置したことから、室内試験においてピーク状態から残留状態へ強度が低下していく過程が地すべりが滑動した状態に近かったと推測される。

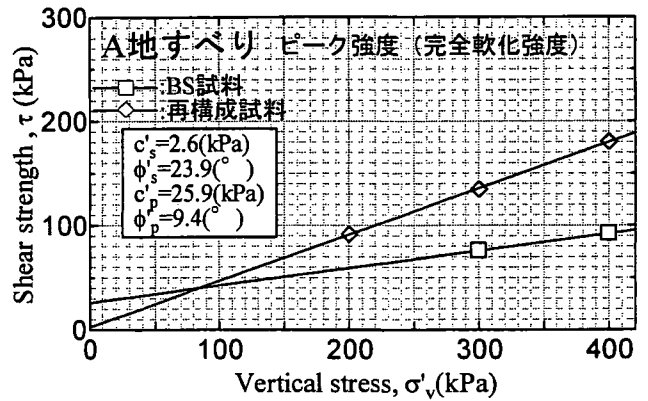


図4 ピーク強度-垂直応力関係

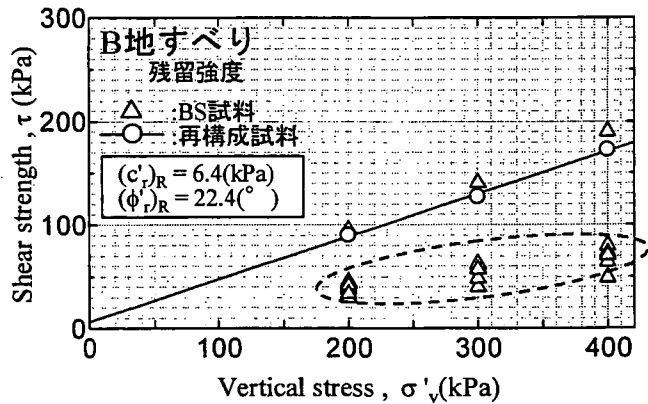


図5 残留強度-垂直応力関係

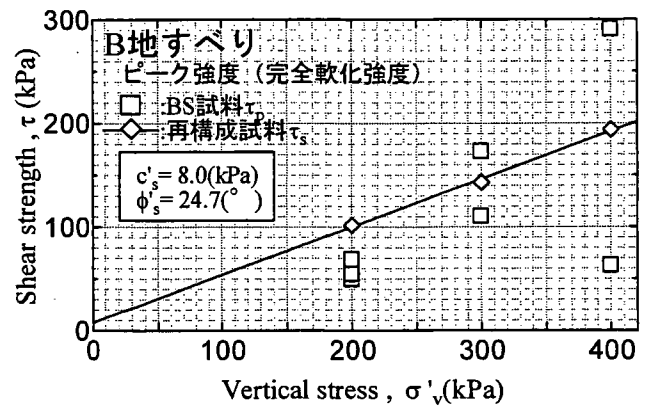


図6 ピーク強度-垂直応力関係

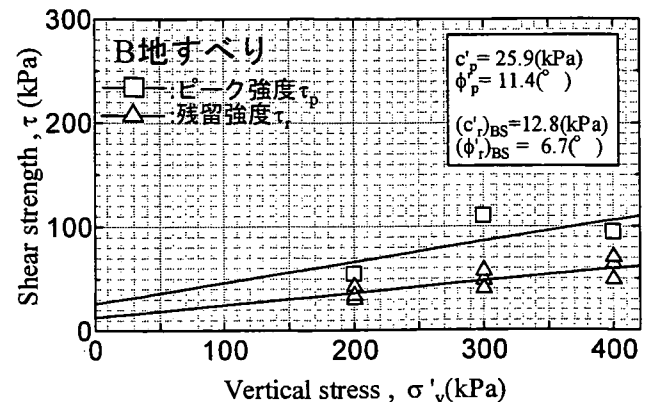


図7 せん断強度-垂直応力関係

ピーク状態せん断抵抗角 ϕ'_p が残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r に比べ小さい値となったが、これはすべり面が限りなく残留状態に近い状態であったこと、またせん断強度のばらつきによりピーク状態強度パラメータの決定に用いたピーク強度が2つと少なかったことが原因である。

5.2 B地すべり

B地すべりにおける $c' - \tan\phi'$ 関係を図9に示す。現状安全率 $F_s=1.0$ における直線式は $c' = -210 \tan\phi' + 68$ で表される。c=d法およびSPLICE法から求まる設計用強度パラメータはそれぞれ $(c', \phi') = (15.0(\text{kPa}), 14.0^\circ)$ 、 $(c', \phi') = (25.6(\text{kPa}), 11.3^\circ)$ となる。

A地すべりの場合と同様の主旨で各種状態強度パラメータにおける安全率を求めたところ、不攪乱試料の残留状態強度パラメータでは $F_s=0.6$ 、ピーク状態強度パラメータでは $F_s=1.0$ となった。不攪乱試料のピーク状態強度パラメータにおける安全率が $F_s=1.0$ となったことから、室内試験においてピーク強度をむかえた時の状況が地すべりが滑動した状態に近かったと推測される。

6. A地すべりにおける残留状態強度パラメータのバラツキについて

SPLICE法の適用に際し、A地すべりの試験結果では不攪乱試料と再構成試料の残留状態強度パラメータ (c'_r, ϕ'_r) が一致せず、再構成試料の残留状態強度パラメータが $F_s=1.0$ に対応する強度定数よりもかなり大きなものであった。この残留強度パラメータのバラツキについて検討するため、不攪乱試料と再構成試料の粒度組成およびスメクタイト含有量の観点からアプローチする。

A地すべりおよびB地すべりにおける各試料の粒度組成を表1にまとめる。まず不攪乱試料における粒度組成について比較する。A地すべりでは粘土含有量が「すべり面(約2cm) > すべり面(約5cm)」、細砂・中砂含有量が「すべり面(約5cm) > すべり面(約2cm)」となり、B地すべりでは粘土含有量が「すべり面(約2cm) > すべり面上部(約2~7cm) > すべり面下部(約2~7cm)」、細砂・中砂含有量が「すべり面上部(約2~7cm) > すべり面下部(約2~7cm) > すべり面(約2cm)」となった。これよりA、B地すべりではすべり面に近づくにつれ粘土含有量が増加し、細砂・中砂含有量が減少すると言える。次にA地すべりにおける不攪乱試料(すべり面約2cm)と再構成試料の粒度組成について比較する。粘土含有量は「すべり面(約2cm) > 再構成」となり、その差は8.2ポイントであった。また細砂・中砂含有量は「再構成 > すべり面(約2cm)」となり、その差は9.6ポイントであった。スラリー試料の粒度組成結果はないが、再構成試料を作製する不攪乱試料の採取範囲から判断すると、粘土含有量は「すべり面(約2cm), スラリー試料 > 再構成試料」、細砂・中砂含有量は「再構成試料 > すべり面(約2cm), スラリー試料」の関係にあると推測できる。表1に示すようにA地すべりにおける残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r は、 $(\phi'_{r,R}) > (\phi'_{r,SL}) > (\phi'_{r,BS})$ となる。 ϕ'_r と粘土含有量の相関を指摘する文献は多いが、粘土含有量の8.2ポイントの差によりBS試料と再構成試料の ϕ'_r の差 11° の原因を断言できるほど明確な相関関係を示すものはない。むしろ細砂・中砂含有量の差9.6ポイントが ϕ'_r の差の原因である可能性が高いと考えた。すなわち粒度組成の違いが ϕ'_r に及ぼす影響は大きく、残留強度パラメータを求めるための再構成試料の作製にあたっては試料の採取位置をすべり面近傍に限定することが必要と考えられる。柴崎ら⁸⁾は、すべり面周辺から採取した試料を粒度調整した再構成試料によるリングせん断試験の結果、425, 75 μm 以下粒径試料では過大なせん断抵抗角が得られ、2 μm 以下粒径試料では現場すべり面のせん断強度レベルまで低下したと報告している。柴崎らの報告と併せて判断すると、残留強度を求めるための再構成試料を作製するには、試料の採取位置をすべり面近傍に限定し、かつ粒度調整を行うことが必要かもしれない。

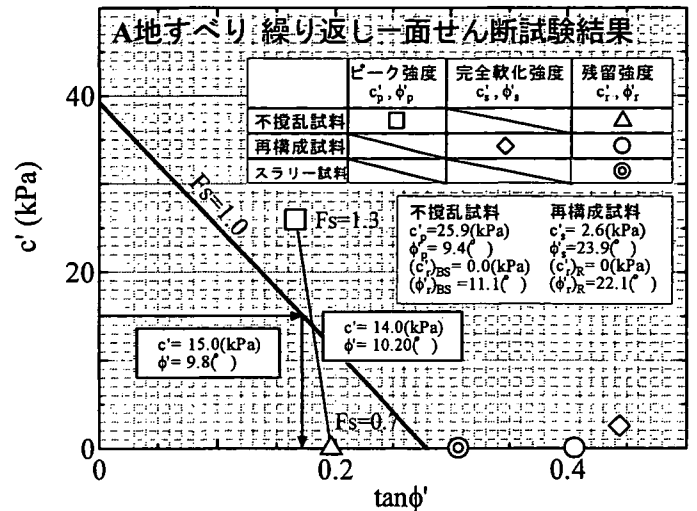


図8 $c' - \tan\phi'$ 関係

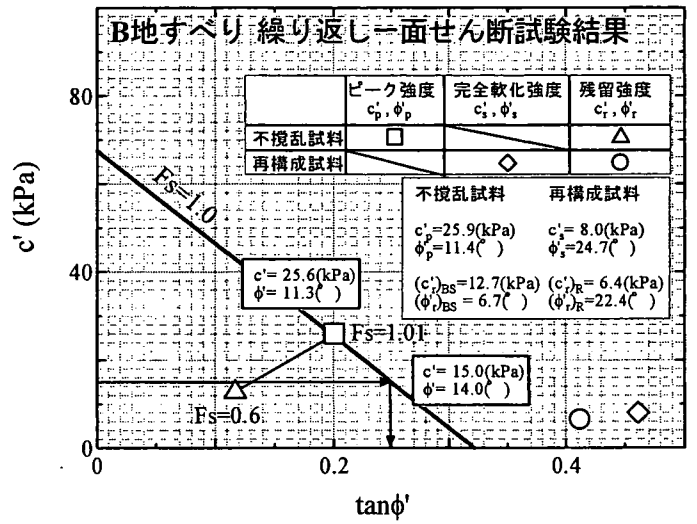


図9 $c' - \tan\phi'$ 関係

過去の研究で得られた残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r とスメクタイト含有量との関係に今回のA地すべりの試験結果を加筆したものを図10に示す。過去の研究⁹⁾において残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r とスメクタイト含有量の間には点線で表されるように、スメクタイト含有量が30%までは残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r と負の相関関係にあり、30%を超えると $\phi'_r=10^\circ$ 付近に収束する傾向があることがわかっている。A地すべりの結果は、従来のデータの範囲にプロットされているが、不攪乱試料、再構成試料、スラリー試料において、スメクタイト含有量は16.8~18.5%くらいとほぼ一定の値を示しているものの、 ϕ'_r には大きな差が認められる。また、不攪乱試料におけるすべり面からの距離とスメクタイト含有量との関係を図11に示す。スメクタイト含有量はすべり面の上下位でも変化せず、ほぼ一定の値を示した。すなわち、不攪乱・再構成試料ともにほぼ一定のスメクタイト含有量を持ち、かつすべり面付近のせん断帯でも同程度のスメクタイトを含有していることから、不攪乱試料と再構成試料の残留状態強度パラメータが一致しないことと、すべり面粘土中のスメクタイト含有量とは関連性に乏しいことが分かる。そこで、残留状態強度パラメータが一致しない原因として以下のようなことを想定した。

- 1) せん断面を構成する粘土中の鉱物種が異なる
- 2) せん断面を構成する粘土鉱物の配向などが異なる

このうち、1)についてはX線回折分析を行い鉱物組成の詳細を検討した(図12)。UT試料の結果より、すべての試料において緑泥石、イライト、石英が含まれているのがわかる。すべり面直上およびすべり面下破砕部から採取された試料ではEG処理において 6° のピークが 5° 付近にシフトしていることから、スメクタイトの含有が明らかである。他方、すべり面粘土、すべり面直下より採取された試料ではスメクタイト含有を示す明瞭な傾向は認められず、 3° 付近にブロードではあるがピークが見られる。このピークの詳細は今後検討の余地を残すが、おそらくスメクタイトを含む混合層粘土鉱物と考えられる。また、2)については今後詳細な検討を行う予定である。

7. まとめ

夕張富野地区から採取された試料について繰り返し一面せん断試験を実施し、得られた強度パラメータから SPLICE 法への適用について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) すべり面近傍の粒度組成はすべり面に近づくにつれ粘土含有量が増加し、細砂・中砂含有量が減少することがわかった。
- 2) 試料の粒度組成において、細砂・中砂含有量が多くなると ϕ'_r が大きくなる可能性が高い。
- 3) すべり面の残留強度を再現する再構成試料を作製するには試料の採取位置をすべり面近傍に限定し、かつ粒度調整を行うことの必要性が示唆された。
- 4) 本試料における残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r とスメクタイト含有量との関係は、過去の研究で得られた結果と同様の傾向を示す。
- 5) 上記1)~4)を勘案して選定した強度パラメータを SPLICE 法に適用して得られた設計用強度パラメータはA地すべりではc=d法とほとんど一致し、B地すべりでは明らかに異なるという結果が得られた。

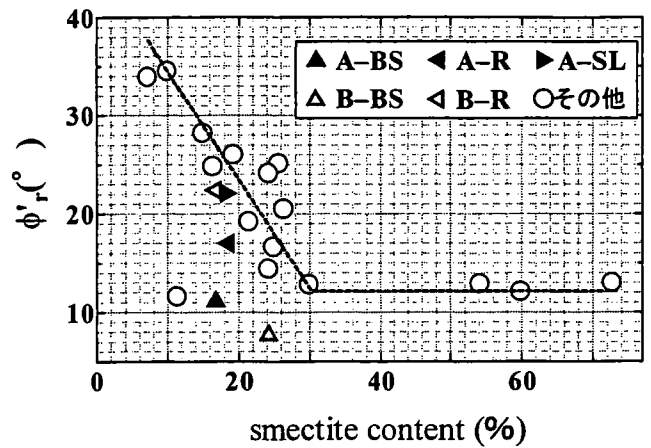


図10 ϕ'_r -スメクタイト含有量関係

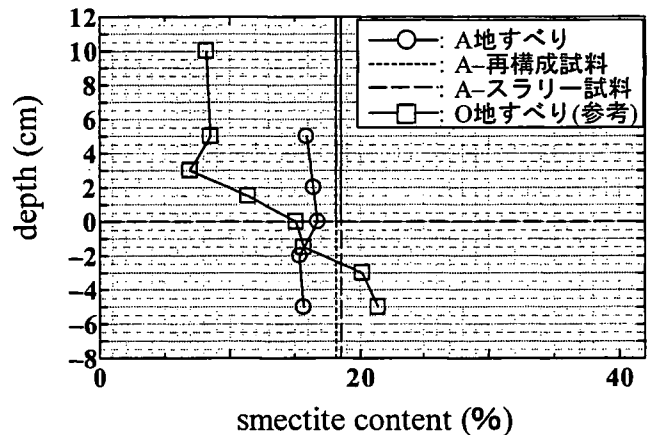


図11 深度-スメクタイト含有量関係

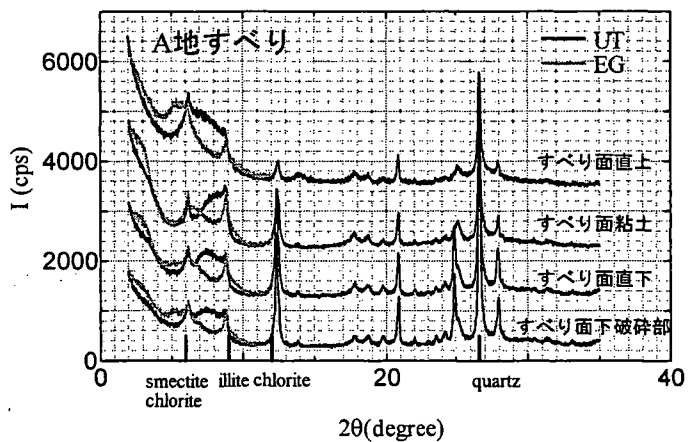


図12 X線反射強度-照射角度関係

謝辞：本研究の実施にあたり，不攪乱試料を提供して頂いた北海道札幌土木現業所およびX線回折試験結果を提供して頂いた北海道大学米田教授に感謝の意を表します。

参考文献：

- 1)日本治山治水協会：治山技術基準解説（地すべり防止編），1987.
- 2)地盤工学会：土質試験の方法と解説，第1回改訂版，pp.441-634,2000.
- 3)地すべり学会東北支部：地すべり安定解析用強度決定法－実務における新たな展開をめざして－,pp.133-137,2001.
- 4)T.Mitachi et al. : Determination of strength parameter for landslide slope stability analysis by laboratory test and inverse calculation engagement, 地すべり, Vol.40, No.2, 2003.
- 5)三田地，九田ほか：全自動繰り返し一面せん断試験装置の開発と安定解析用強度パラメータの決定，第39回地すべり学会研究発表会講演集，pp.265-268, 2000.
- 6)伊藤，三田地ほか：繰り返し一面せん断試験による残留強度パラメータの評価方法，第39回地盤工学研究発表会，pp.335-336, 2004.
- 7)鷲，三田地ほか：繰り返し一面せん断による不攪乱・再構成試料の強度比較，第39回地盤工学研究発表会，pp.333-334, 2004.
- 8)柴崎，由田，眞弓，山崎：地すべり粘土の残留強度に及ぼす粒度調整の影響，第39回地盤工学研究発表会，pp.339-340, 2004.
- 9)石橋，三田地ほか：残留強度に及ぼす圧密履歴の影響と地すべり対策工設計用強度パラメータの決定法について，第38回地盤工学研究発表会，pp.221-222, 2003.

原子間力顕微鏡による粘土の残留状態せん断面の表面粗さおよび摩擦力測定

岩手大学大学院工学研究科 学生会員 ○久 常 雄大
 岩手大学工学部 正会員 大河原 正文
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 三田地 利之

1. はじめに

従来、粘土のせん断強度に関する研究は、主として一面せん断試験、三軸試験など室内要素試験により行われ、せん断応力載荷型、主応力載荷型を問わずセンチメートルサイズの供試体から得られたせん断強度に基づいて検討されてきた。ところで近年のナノテクノロジーに代表される高度産業技術分野では、技術革新によりマイクロからナノサイズでの各種測定・分析を可能にしている。原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) は、その名のとおり原子間力を測定するための顕微鏡として 1986 年に IBM のビニヒラにより開発され、現在では原子サイズの形態情報、粘弾性、磁気力などを求めることができる。注目すべきは、AFM が粒子表面の摩擦力や表面物質の吸着力を測定できることで、これにより例えばマイクロサイズでの土粒子表面の摩擦力や吸着水の吸着力を直接測定できる。そこで本研究では、粘土の残留強度を対象に、せん断試験により作製された残留状態でのせん断面を AFM で測定し、得られた各種物性値より“ミクロを積分するとマクロになるのか”といった本質的な問題について検討した。残留強度を対象にしたのは、残留状態におけるせん断が平滑な二表面間の摩擦現象と考えられている¹⁾ ことから、得られる強度はマクロな摩擦力であり、AFM により測定される摩擦力と比較できると考えたからである。

AFM³⁾ とは、小さな突起先端 (探針) と試料表面の間に働く原子間力をこの変形として測定する顕微鏡である。AFM でこの変形を計測する方法としては、様々であるが、本研究では、この背面に斜めからレーザー光を照射して、この変形に伴う光の反射角変化を測定する光てこ方式の AFM を用いた。図 1 に動作原理を示す。この光てこ方式は 4 分割の光検出器を用いて、このねじれとたわみを測定する。また、AFM の動作方式およびその特徴²⁾ としては、探針を試料表面に接触させて、試料表面の凹凸情報および摩擦力を測定することができる接触方式(Contact mode)、探針を周期的に接触させ試料表面の破壊を最小限に抑え、カンチレバーの振幅の変化から試料表面の凹凸情報を得られるタッピング方式(Tapping mode)、探針を試料表面に接触させずにカンチレバーの振動周波数の変化から試料表面の静電気力分布や磁力分布などを測定する非接触方式(n-Contact mode)などの方式がある。本研究では、対象物の物性と測定項目を考慮して接触方式およびタッピング方式による測定を採用した。図 2 に接触方式とタッピング方式の測定原理を示す。

以下に研究項目とその着眼点について述べる。なお、本研究で対象とする領域は、使用した AFM の性能から長さはマイクロメートル ($1\mu\text{m}=0.001\text{mm}$) オーダー、力はナニュートン ($1\text{nN}=1\times 10^{-9}\text{N}$) オーダーである。

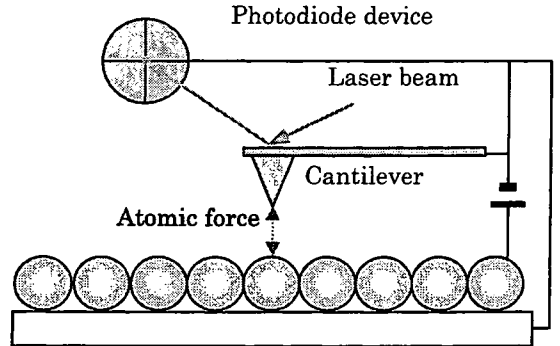
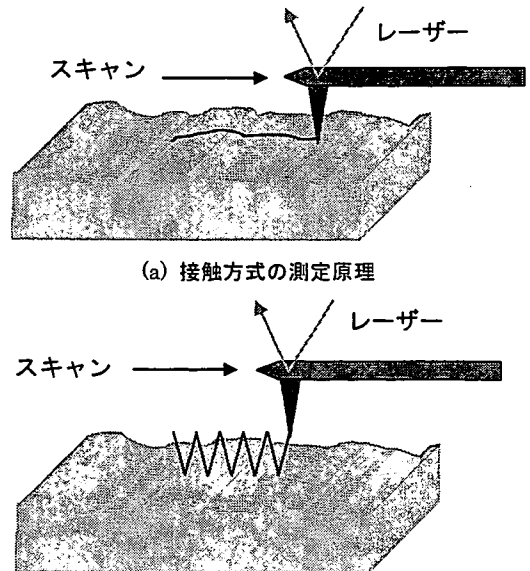


図 1 原子間力顕微鏡の動作原理



写真 1 原子間力顕微鏡



(a) 接触方式の測定原理
 (b) タッピング方式の測定原理
 図 2 AFM の動作方式の原理

(1) 粘土の残留状態せん断面の表面解析

マイクロ領域におけるせん断面の表面粗さを求めるためにタッピング方式による表面凹凸測定を行った。得られた凹凸データは表面粗さのパラメータである「算術平均高さ R_a 」および「表面積増加率 RIA」の算出に用いた。算術平均高さ R_a は、JIS に「粗さ曲線から、その平均線に基準長さ l だけ抜き取り、この抜き取りの部分の平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合計し、平均した値」と規定され、工学的に重要である。図 3 に算術平均高さ R_a の概念図を示す。表面積増加率 RIA は、測定範囲におけるうねりの大きさを捉えるものである。これら 2 つのパラメータから粘土の残留状態せん断面の表面粗さを定量的に評価した。

(2) 粘土の摩擦力測定

せん断面を構成する粘土粒子表面の摩擦力を測定した。測定は接触方式とし、プローブの走査方向を直線に固定することで、マイクロ領域での繰り返し一面せん断試験を再現した。摩擦力測定においては、プローブ先端を試料表面に押し付ける力を調節できるので垂直荷重の設定が可能である。摩擦力と垂直荷重との関係から摩擦角 ϕ を算出した。

(3) 水の吸着力測定

フォース・カーブの測定から粘土粒子表面に付着する水の吸着力を求めた。フォース・カーブの測定原理を図 4 に示す。フォース・カーブとは、てこを試料に近づけた場合のこの変位を垂直方向の移動距離の関数として測定し、測定されるカーブをフォース・カーブという。測定はタッピング方式で行い同時に測定点の凹凸を測定した。

(4) 摩擦力の速度依存性の検証

プローブの走査速度を変えて粘土の摩擦力を測定した。このときフォース・カーブより垂直荷重を算出しておき摩擦角 ϕ を求めた。摩擦角 ϕ から粘土の摩擦力について走査速度依存性を検証した。

2. 試料および試料作製

試料には、Na-montmorillonite を主成分としたクニピア・F (クミネ工業) および Kaolinite を主成分としたカオリン・KH (カナヤ興産)、Pyrophyllite および石英を主成分とした NSF 粘土 (カナヤ興産) を用いた。クニピア・F およびカオリン・KH は、高純度粘土鉱物であることを XRD 分析および EPMA において確認した。NSF 粘土は、土質試験用の粘土試料として広く利用されている。図 5~7 に 3 種類の粘土鉱物の X 線回折パターンを示す。

AFM により粘土の残留状態せん断面の測定を行うために、試料調整および試料作製を行った。

(1) 残留状態せん断面の作製

表面解析および水の吸着力測定用として粘土の大変位一面せん断試験を行いせん断面を作製した。試験装置は、岩手大学で試作された大変位一面せん断試験装置である。試料作製方法は、粉末試料に脱気したイオン交換水を加え、スラリー状態になるまで攪拌した粘土を 30 分間脱気した後、

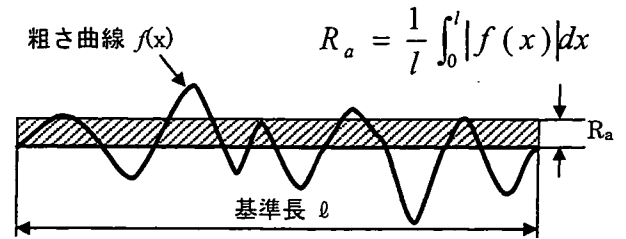
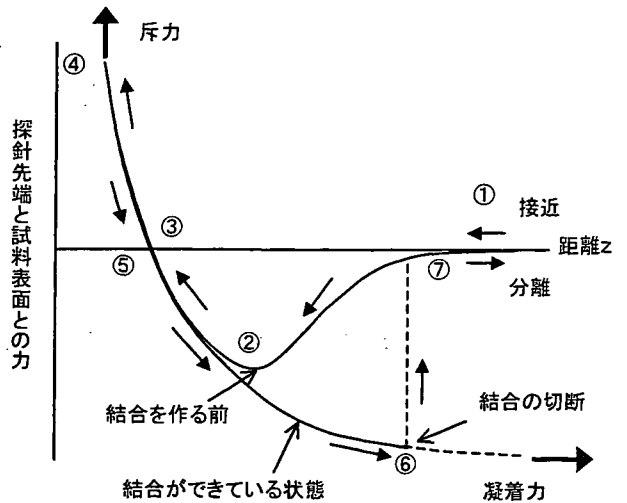
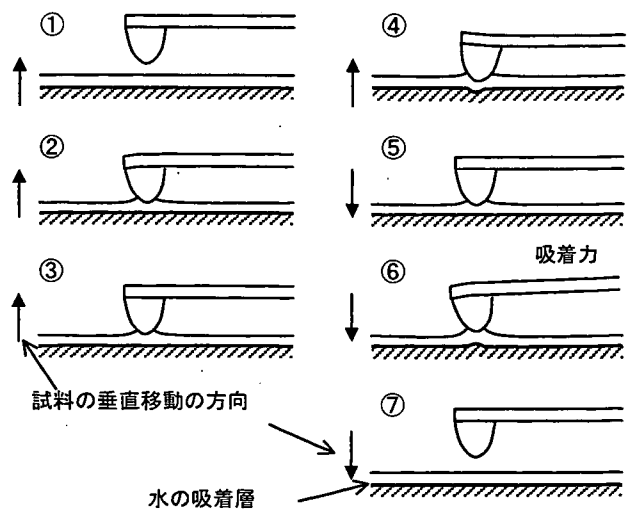


図 3 算術平均高さの R_a 概念図



(a) プローブ先端と試料表面に働く力と距離との関係



(b) プローブ先端と試料表面との位置関係

図 4 タッピング・フォースの測定原理²⁾

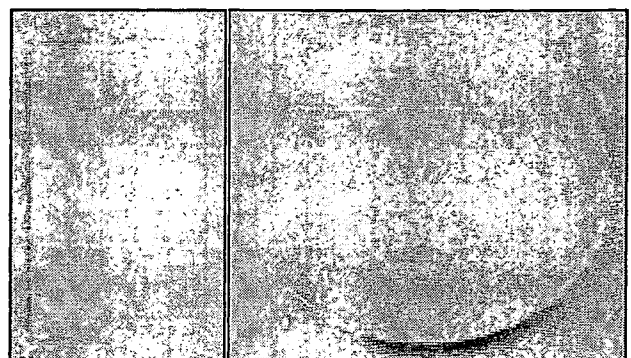


写真 2 水吸試料写真

(左: スライドガラス, 右: シリコンウェハ)

150kPa の垂直応力を載荷して 7 日間予圧密して成型する (クニピア-F は 400kPa で 21 日間)。成型した粘土試料を大変位一面せん断試験装置で垂直応力 50kPa において圧密、せん断を行った。圧密時の打ち切り時間は、3t 法により判断した。せん断試験は、粘土が完全配向して残留状態に至らせるために、せん断速度 0.5mm/min でせん断変位 200mm までせん断した。せん断試験終了後、残留状態に至ったせん断断面を採取し、AFM 測定用試料とした。

(2) 水籤試料の作製

摩擦力測定、水の吸着力測定ならびに走査速度依存性の検討試料として粘土の水籤試料を作製した。すなわち粘土に蒸留水を加え攪拌した水溶液を基盤上に滴下し、室温で乾燥させたものを試料とした。基盤は、水の吸着力測定がスライドガラス、摩擦力測定および走査速度依存性の検討がシリコンウェハである。写真 2 は、粘土試料を滴下して乾燥させたスライドガラスおよびシリコンウェハである。

3. 測定

(1) 残留状態せん断面の表面解析

原子間力顕微鏡 (Veeco 社, Nano ScopeIII) を使用して残留状態せん断面の凹凸測定ならびに表面解析を行った。測定はタッピング方式により行い測定範囲 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 、プローブは NCH(ナノワールド社)を使用した。試料はクニピア-F、カオリン-KH、NSF 粘土の 3 試料とし、大変位一面せん断試験により作製した残留状態せん断面を用いた。測定は、スキャン開始直後 1 スキャンラインで固定した状態で、往復の凹凸波形およびエラー波形が一致するようにパラメータを調整した。調整後、 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ の範囲をスキャンさせ凹凸像を得た。測定された凹凸像から付属の表面解析ソフトにより表面解析を行い「算術平均高さ R_a 」, 「試料表面の表面積増加率 RIA」の 2 つの粗さパラメータを求めた。

(2) 粘土の摩擦力測定

接触方式により粘土の摩擦力を測定した。測定条件は、測定範囲 $10\mu\text{m}$ の 1 スキャンライン固定とし、走査速度 $8.3\mu\text{m}/\text{sec}$ 、Deflection Setpoint を $0 \sim 1.0\text{V}$ の範囲で変化させた。測定データは高さデータおよび摩擦力データである。プローブは、Cont(ナノワールド社)を使用した。試料は、クニピア-F およびカオリン-KH とし、シリコンウェハ基盤に滴下したものを乾燥させた試料とした。測定は、試料ステージに取り付けた試料にプローブを近づけてスキャンを開始させ、1 スキャンライン上で固定した状態でパラメータを調整した後、一定値となった摩擦力を測定した。測定後、フォースモードに移行してフォース・カーブを測定し、垂直荷重を次式により求めた。ここで F は垂直荷重(nN)、 K はプローブのバネ定数(N/m)、 ΔA はプローブの変位(nm)である。

$$F = K \cdot \Delta A$$

(3) 水の吸着力測定

タッピング方式により、残留状態せん断面のタッピング・フォースを測定し、せん断面に存在する水の吸着力を求めた。測定条件は、Amplitude Setpoint を 0.4V 、プローブは NCH(ナノワールド社)を使用した。試料は、クニピア-F、カオリン-KH とし、湿潤状態の試料は大変位一面せん断試験による残留状態せん断面、乾燥状態の試料はスライドガラスに水籤した試料とした。測定は、試料ステージに取り付けた試料にプローブを近づけてスキャンを開始させる。測定は、1 スキャンライン上で行い、パラメータ調整を行った後、フォース・モードに移行してフォース・カーブを測定した。測定したフォース・カーブからタッピング・フォースのパラメータを求め次式により吸着力を求めた。このとき、あわせてタッピング・フォース測定時の凹凸像も取得した。

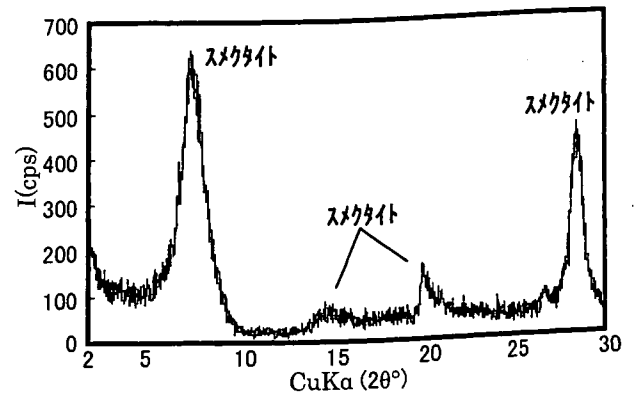


図 5 クニピア-F の X 線プロファイル

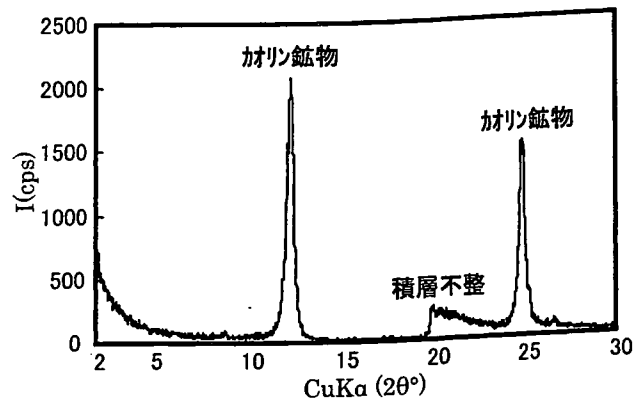


図 6 カオリン-KH の X 線プロファイル

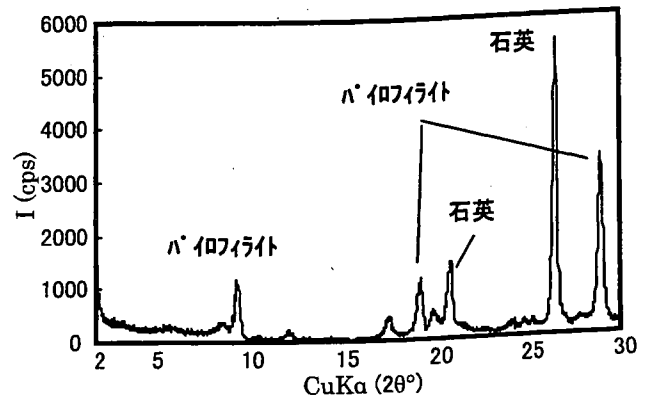


図 7 NSF 粘土の X 線プロファイル

$$\Delta A = \frac{A_0^2 - A^2}{2AQ}, \quad F = K \cdot \Delta A$$

(4) 摩擦力のせん断速度依存性の検証

接触方式により粘土粒子表面の摩擦力を測定した。測定条件は、測定範囲 $10\mu\text{m}$ の 1 スキャンライン固定とし、走査速度を $16.6\mu\text{m}/\text{sec}$, $1.7\mu\text{m}/\text{sec}$, $0.2\mu\text{m}/\text{sec}$ とした。Deflection Setpoint を $0\sim 1.0\text{V}$ の範囲で変化させた。測定データは高さデータおよび摩擦力データである。プローブは、Cont(ナノワールド社)を使用した。試料は、クニピア-F およびカオリン-KH とし、シリコンウェハ基盤に水簸した試料とした。測定方法は、試料ステージに設置した試料にプローブを近づけてスキャンを開始させる。測定は、1 スキャンライン上で固定した状態でパラメータを調整、高さデータを一定にした後、一定値となった摩擦力を測定する。測定後、フォースモードに移行してフォース・カーブを測定し、垂直荷重を次式により求めた。

$$F = K \cdot \Delta A$$

4. 測定結果および考察

(1) 残留状態せん断面の表面解析

図 8 にクニピア-F, カオリン-KH, NSF 粘土の残留状態せん断面の凹凸像, 断面画像, 3 次元凹凸像を示す。なお、中段の断面画像の断面位置は上段凹凸像の直線部である。表 1 に AFM により測定した粘土の残留状態せん断面の表面粗さ解析結果, 算術平均高さ R_a および表面積増加率 RIA の値を示す。

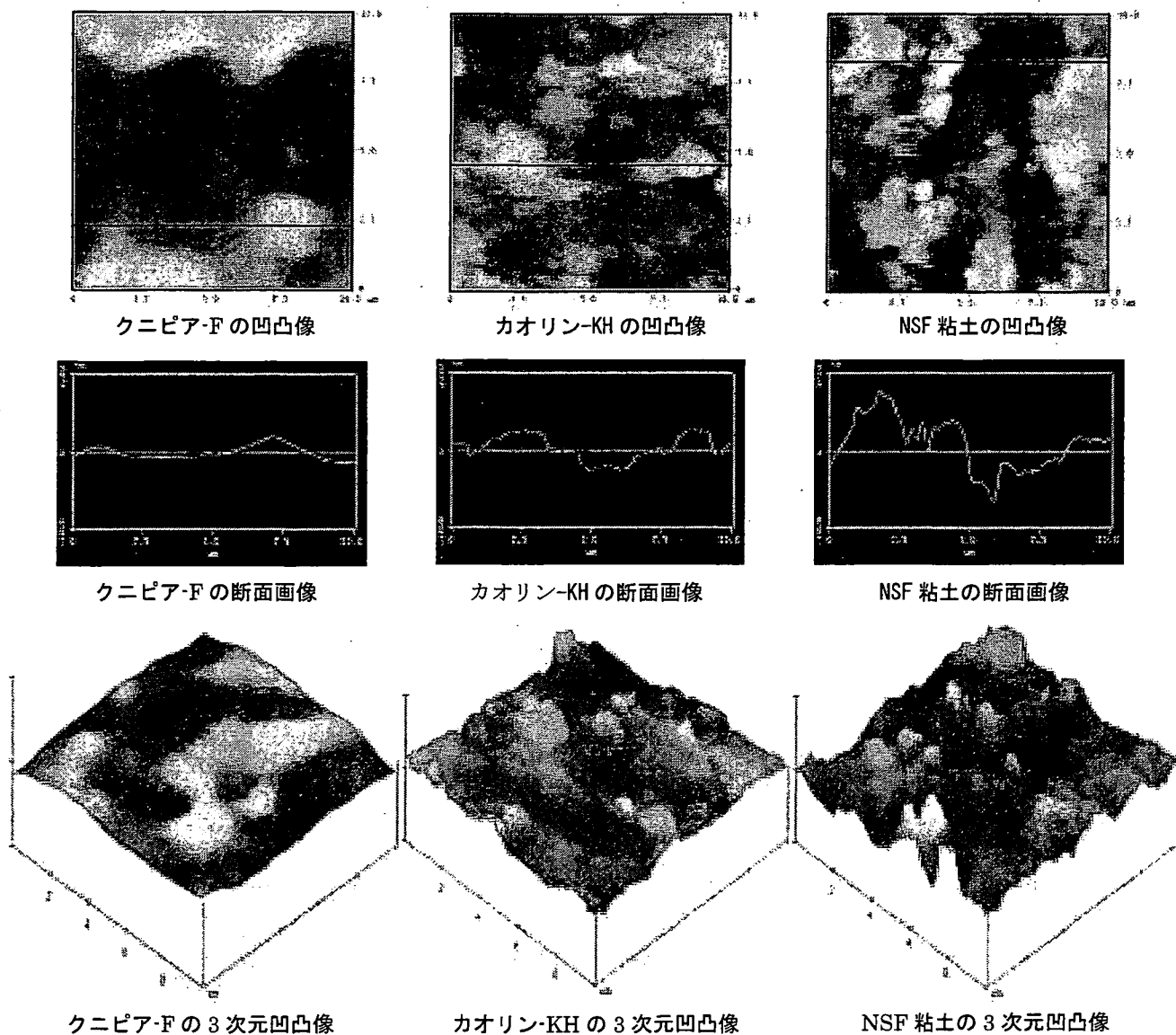


図 8 粘土の残留状態せん断面の AFM 測定結果

AFM 画像から、3 試料ともに粗さがあることが確認された。3 次元凹凸画像から、残留状態せん断面の粗さの程度に差があることがわかる。クニピア-F が最も滑らかなせん断面を形成しており、断面画像にも緩やかな様子が示されている。一方、カオリン-KH は粗く、断面画像から凹凸の高低差、起伏ともにクニピア-F と比べて大きい。NSF 粘土は最も粗い表面をもち断面データから凹凸の高低差、起伏ともに最大であった。

表 1 残留状態せん断面の表面解析結果

| kunipia-F | | kaolin-KH | | NSF-clay | |
|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| R _a (nm) | RIA (%) | R _a (nm) | RIA (%) | R _a (nm) | RIA (%) |
| 47.58 | 0.69 | 191.70 | 19.92 | 232.04 | 20.11 |
| 46.69 | 0.68 | 154.07 | 33.76 | 283.68 | 33.67 |
| 49.57 | 0.70 | 114.68 | 14.08 | 275.47 | 38.60 |

なお、NSF 粘土は、主成分がパイロフィライトおよび石英で、粗さに石英粒子の大きさが影響している可能性がある。残留状態せん断面の表面解析結果より、表面粗さはクニピア-F、カオリン-KH、NSF 粘土の順に粗くなることが確認された。また、表面積増加率 RIA より、クニピア-F の表面積増加率が極端に小さく、カオリン-KH、NSF 粘土は大きい。特筆すべき点は、クニピア-F がカオリン-KH および NSF 粘土と比較して、測定点に関わらず R_z、RIA とともにほぼ一定の値を示した点である。これは、クニピア-F の残留状態せん断面が凹凸、うねりともに変化の少ない非常に滑らかなせん断面であることを意味する。一方、カオリン-KH および NSF 粘土は、測定点により値に大きな差が出た。これは、残留状態せん断面に大きな凹凸が存在しており、かつ大きなうねりが存在するためである。

タッピング方式による表面測定の結果、粘土の残留状態せん断面は粗さがあり、粗い順に NSF 粘土 (R_a=263.7nm, RIA=30.8%) > カオリン-KH (R_a=153.4nm, RIA=22.6%) > クニピア-F (R_a=47.9nm, RIA=0.69%) であった。

(2) 粘土の摩擦係数測定

図 9、図 10 にクニピア-F およびカオリン-KH の垂直荷重-摩擦係数関係図を示す。垂直荷重はフォース・カーブ測定より算出した。摩擦係数については使用した AFM に力(nN)に換算する機能がなく、測定値は電圧 mV で表示される。そこで既存の研究において摩擦係数が得られているシリコンウェハを測定し、得られた電圧(mV)と摩擦係数(nN)との換算係数を求めて力を算出した。

測定結果より、クニピア-F、カオリン-KH とともに垂直荷重と摩擦係数との間に直線性が得られた。クニピア-F の摩擦係数 $\mu = 0.0266$ 、摩擦角 $\phi = 1.5^\circ$ 、カオリン-KH の $\mu = 0.0653$ 、 $\phi = 3.7^\circ$ で、カオリン-KH がクニピア-F をわずかに上回る結果を得た。しかしながら、クニピア-F およびカオリン-KH とともに摩擦角 ϕ は非常に小さく、垂直荷重の増加による大幅な摩擦係数の増加は期待されない。

つぎに AFM により得られた摩擦角 ϕ と大変位一面せん断試験のせん断抵抗角 ϕ'_r と比較した結果について述べる。乾燥状態の粘土試料による大変位一面せん断試験からクニピア-F のせん断抵抗角 $\phi'_r = 19.0^\circ$ (AFM 摩擦角 $\phi = 1.5^\circ$)、カオリン-KH の $\phi'_r = 24.9^\circ$ (AFM 摩擦角 $\phi = 3.7^\circ$) が得られている。摩擦角 ϕ とせん断抵抗角 ϕ'_r には、明らかに差があることが確認された。マイクロ領域における ϕ とマクロ領域における ϕ'_r が異なることを示唆している。注意すべきは AFM での摩擦係数測定がプローブ先端 Si 原子と粘土粒子との摩擦であるのに対し、大変位一面せん断試験では粘土粒子同士の摩擦である。このように摩擦を起こしている物質が異なるため単純に比較はできないが、マクロ値とマイクロ値が異なるといった同様の結果が得られている^{5), 6), 7)}。

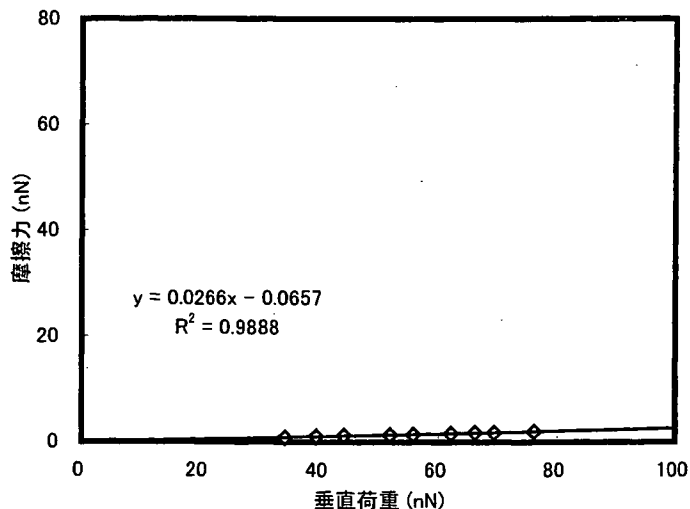


図 9 クニピア-F の垂直荷重-摩擦係数関係図

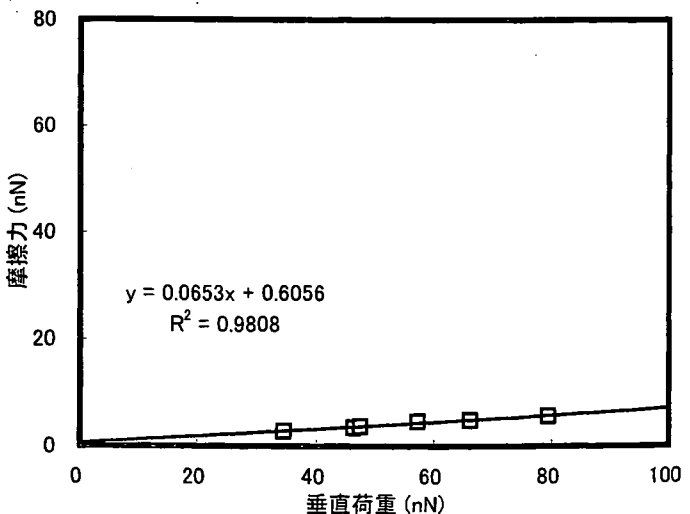


図 10 カオリン-KH の垂直荷重-摩擦係数関係図

(3) 水の吸着力測定

図 11, 12 にクニピア-F およびカオリン-KH の水の吸着力測定結果を示す。図には乾燥状態の粘土の測定結果をあわせて示した。縦軸(対数表示)の Tapping force は試料表面の水の吸着力を示している。

測定結果から、クニピア-F の吸着力は、乾燥状態で $0.1 \sim 3.3 \text{ nN}$ (平均 $6.6 \times 10^{-1} \text{ nN}$)、湿潤状態で $0.006 \sim 0.1 \text{ nN}$ (平均 $4.1 \times 10^{-2} \text{ nN}$) と含水により吸着力が減少している。カオリン-KH の吸着力は、乾燥状態で $0.07 \sim 3.0 \text{ nN}$ (平均 $5.6 \times 10^{-1} \text{ nN}$)、湿潤状態で $0.3 \sim 2.6 \text{ nN}$ (平均 $8.9 \times 10^{-1} \text{ nN}$) と含水しても吸着力がほとんど変化しない。

粘土中の水分は、粘土の水分を保持能力によって存在形態が異なる。Rode³⁾は、結晶水を除き粘土中を移動可能な水を自由水、弱吸着水、強吸着水、蒸気体水分の大きく 4 項目に分類した。自由水は重力や毛管力によって移動する水、弱吸着水は吸着力によって粒子表面に水分子が一定な方向に配列している水で、厚さは水分子の数 10～数 100 層の薄膜状である。強吸着水は水分子が粒子に向かって一定方向に配列し、吸着力によってかたく保持された水で、厚さは水分子径の数倍で固体に近い挙動を示す。蒸気体水分は水蒸気の形で、間隙中に存在する水分で温度変化や空気の流れて移動する。試料は水で飽和しているため蒸気体水分は存在しないと考えられる。AFM のプローブを押し付けて離す場合の吸着力の大きさを考察するにあたり、自由水、弱吸着水、強吸着水との関係について考察した。粘土粒子に保持されている水は、自由水<弱吸着水<強吸着水の順で粘土粒子に吸着する力が大きくなる。ここで強吸着水は固体に近い挙動を示すことから、押し付けたプローブが強吸着水に吸着する(突き刺さる)ことは不可能であると考えられる。そのため残留状態せん断面に存在する弱吸着水にプローブが進入することでフォースカーブを測定しているものと考えられる。図 13 は、吸着水の結合強さと水膜の厚さとの関係であるが、吸着水の厚さが増加するに伴い吸着力が低下することがわかる。おそらく AFM による水の吸着力測定では、粘土粒子表面の弱吸着水の吸着力を測定しており、吸着力は弱吸着水の厚さと関係をもつとみられる。以上から、粘土粒子表面に存在する吸着水の厚さは、湿潤状態のクニピア-F が最も厚く、他の 3 試料は同程度の厚さであると考えられる。

図中の横軸の Asperity height とは、吸着力を測定する際の凹凸の大小を示したものである。正の領域は上に凸の状態を示し、負の領域は下に凸の状態を示している。図 11 のクニピア-F の乾燥状態については、測定時に凹凸の小さな場所で吸着力を測定してしまったために 0 付近に値が固まってしまう考察することはできないが、乾燥状態のクニピア-F および、乾燥、湿潤状態のカオリン-KH における試料表面の凹凸の大小と吸着力との関係から、試料表面の凹凸の大きさ、山谷の変化により吸着力が増減するかを検討した。測定結果から、試料表面の凹凸の大小と吸着力にさほど差は見られなかった。これにより、粘土の表面には凹凸があるが、粘土の表面に存在する吸着水は均等な厚さをもっている、あるいは、吸着水の厚さに多少の差はあるが吸着水の特性に差はみられない。

以上、フォースカーブ測定の結果からクニピア-F の吸着力は乾燥 $6.6 \times 10^{-1} \text{ nN}$ 、湿潤 $4.1 \times 10^{-2} \text{ nN}$ 、カオリン-KH は乾燥 $5.6 \times 10^{-1} \text{ nN}$ 、湿潤 $8.9 \times 10^{-1} \text{ nN}$ であり、クニピア-F の吸着力が湿潤状態になると小さくなることが明らかになった。

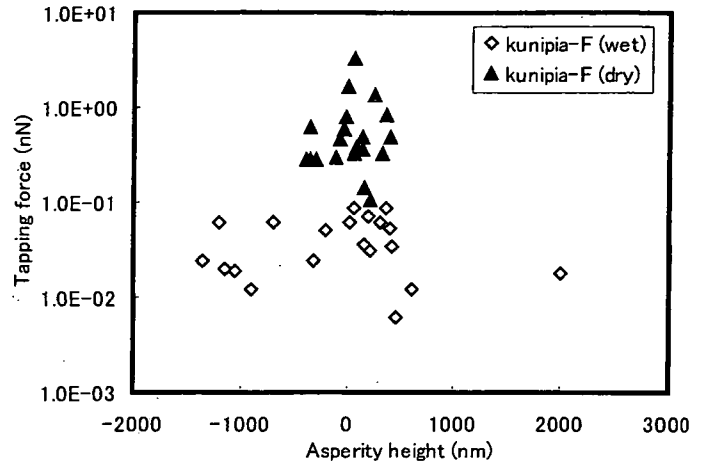


図 11 クニピア-F の吸着力測定結果

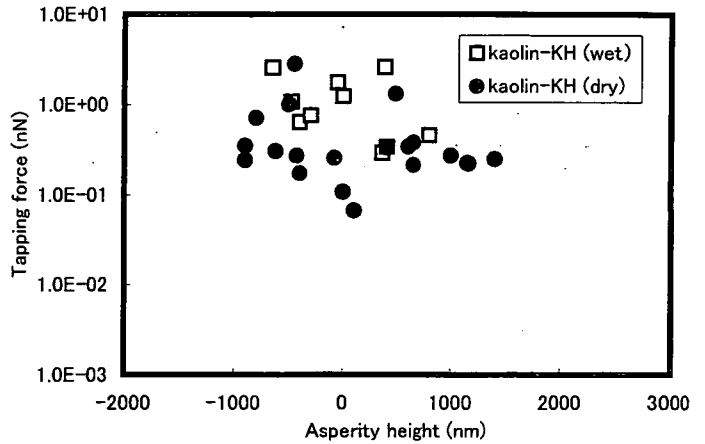


図 12 カオリン-KH の吸着力測定結果

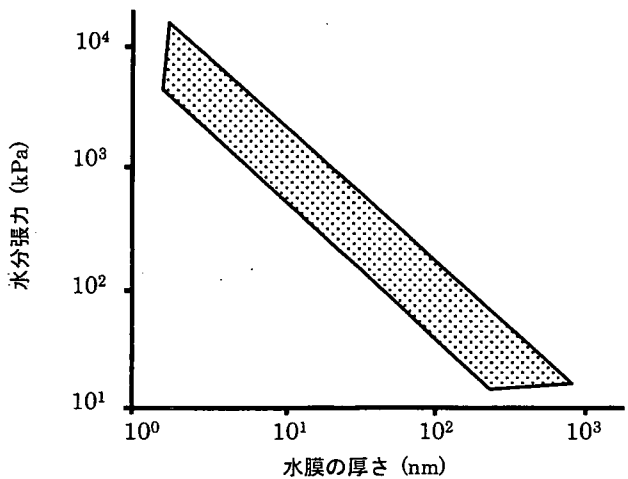


図 13 吸着力の結合強さと水膜の厚さとの関係⁴⁾

(Kemper and Rollins, 1966)

(4) 粘土の摩擦力における走査速度依存性の検証

図 14, 図 15 にクニピア-F およびカオリン-KH の垂直荷重-摩擦力関係図を示す。図中の垂直荷重および摩擦力より算出した摩擦係数 μ および摩擦角 ϕ の値を表 2, 3 に示す。なお、摩擦力の算出については、前述の(3)粘土の摩擦力測定と同じ方法により電圧(mV)を力(nN)に変換した値である。走査速度は $16.6 \mu\text{m/sec}$ ($=1.0\text{mm/min}$), $1.7 \mu\text{m/sec}$ ($=0.1\text{mm/min}$) および $0.2 \mu\text{m/sec}$ ($=0.01\text{mm/min}$) である。異なる走査速度のもとで摩擦角 ϕ を求めることにより速度依存性の有無を検証した。また、(2)粘土の摩擦力測定で述べたとおり、本研究での摩擦力測定は、AFM のプローブ先端と粘土との間で発揮される摩擦力である。よってここでの考察は、AFM のプローブの材料であるケイ素 Si と粘土鉱物との摩擦力における走査速度依存性の有無についてである。

測定結果より、クニピア-F, カオリン-KH とともに走査速度ごとに摩擦角 ϕ に違いがみられた。しかし、表 2, 表 3 に示されるようにその差はごく僅かである。クニピア-F の摩擦角 ϕ は、走査速度 $16.6 \mu\text{m/sec}$ ($\phi = 1.17^\circ$) $< 1.7 \mu\text{m/sec}$ ($\phi = 1.18^\circ$) $< 0.2 \mu\text{m/sec}$ ($\phi = 1.23^\circ$) となり、走査速度が小さくなると ϕ が大きくなるように見える。しかし、4.(2)粘土の摩擦力測定では、走査速度が $8.3 \mu\text{m/sec}$ のときクニピア-F の摩擦角が $\phi = 1.5^\circ$ であり、表 2 の関係 (速度が小 $\rightarrow \phi$ が大) を満たさない。表 2 にみられる測定結果の違いは、測定誤差の範囲と考えられる。カオリン-KH の摩擦角 ϕ については走査速度との関係は認められない。

以上、走査速度依存性の検証実験の結果、クニピア-F, カオリン-KH とともに速度依存性は認められなかった。

5. まとめ

原子間力顕微鏡によるマイクロ領域での各種測定の結果、粘土の残留状態せん断面の表面物性として得られた知見を以下に示す。

- ① タッピング方式による表面測定の結果、粘土の残留状態せん断面は平滑ではなく、粗い順に NSF 粘土 ($Ra=263.7\text{nm}$, $RIA=30.8\%$) $>$ カオリン-KH ($Ra=153.4\text{nm}$, $RIA=22.6\%$) $>$ クニピア-F ($Ra=47.9\text{nm}$, $RIA=0.69\%$) である。
- ② 接触方式による摩擦力測定の結果、クニピア-F の摩擦角は $\phi = 1.5^\circ$, カオリン-KH は $\phi = 3.7^\circ$ であり、マクロ値 (クニピア-F が $\phi_r=19.0^\circ$, カオリン-KH が $\phi_r=24.9^\circ$) と一致しない。マイクロ値を積分してもマクロ値にならないようである。
- ③ フォースカーブ測定の結果、クニピア-F の吸着力は乾燥 $6.6 \times 10^{-1}\text{nN}$, 湿潤 $4.1 \times 10^{-2}\text{nN}$, カオリン-KH は乾燥 $5.6 \times 10^{-1}\text{nN}$, 湿潤 $8.9 \times 10^{-1}\text{nN}$ であり、クニピア-F の吸着力が湿潤状態になると小さくなる。
- ④ 走査速度依存性の検証実験の結果、クニピア-F, カオリン-KH とともに速度依存性は認められない。

6. おわりに

本研究では粘土の残留状態せん断面を対象に AFM による各種測定を行ったが測定条件の最適化に時間を要した。測定結果にも測定誤差があると考えられるので、より測定精度を高め、質の高い結果を出すことにより今後の議論を深めたい。また、他の粘土鉱物についても検討すべきである。

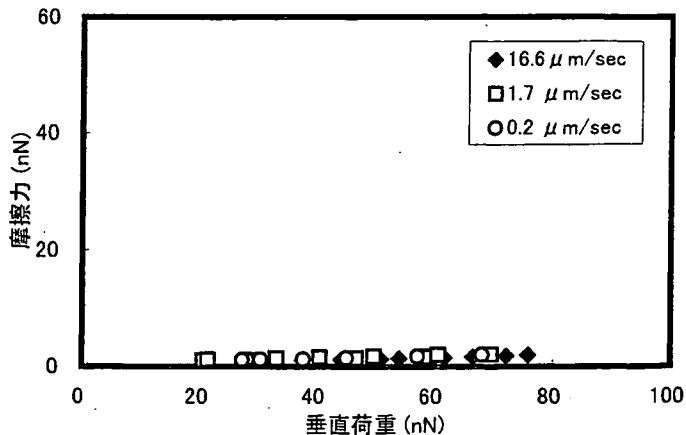


図 14 クニピア-F の垂直荷重-摩擦力関係図

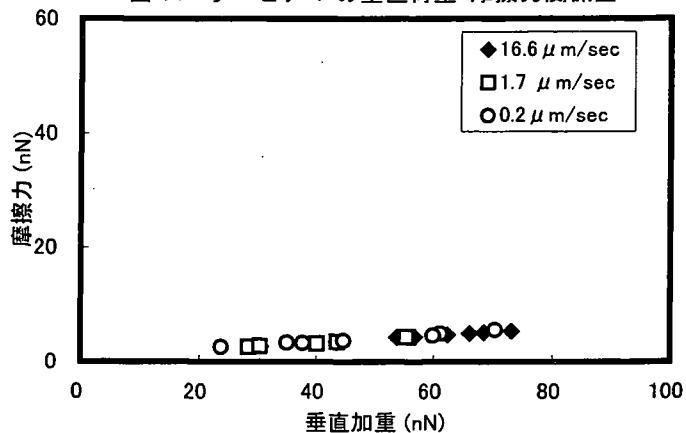


図 15 カオリン-KH の垂直荷重-摩擦力関係図

表 2 クニピア-F の摩擦係数 μ および摩擦角 ϕ

| 走査速度 ($\mu\text{m/sec}$) | 摩擦係数 μ | 摩擦角 ϕ |
|----------------------------|------------|--------------|
| 16.6 | 0.0205 | 1.17° |
| 1.7 | 0.0206 | 1.18° |
| 0.2 | 0.0214 | 1.23° |

表 3 カオリン-KH の摩擦係数 μ および摩擦角 ϕ

| 走査速度 ($\mu\text{m/sec}$) | 摩擦係数 μ | 摩擦角 ϕ |
|----------------------------|------------|--------------|
| 16.6 | 0.0626 | 3.58° |
| 1.7 | 0.0634 | 3.63° |
| 0.2 | 0.0624 | 3.57° |

残留状態せん断面の表面解析および水の吸着力測定では、大気中での測定のため試料表面の水分が失われてしまった。したがって、今後は相対湿度の調整が必要でせん断試験直後の残留状態せん断面の状態を保持しながら測定することと、あえて相対湿度を変化させることにより粘土の残留状態せん断面がどのように変化するかを測定することが重要である。

摩擦測定では、乾燥状態の試料だけの結果であり、今後、測定方法を工夫して湿潤試料の摩擦力を測定することが不可欠である。また、せん断抵抗角 ϕ は応力により算出されるが、本研究での摩擦測定においては、AFMのプローブと試料表面との接触面積の測定を行うことができなかったため、摩擦測定時の真実接触面積についても検討が必要である。したがって、AFM測定時のその場観察をするとともに接触面積の測定を行い、力(nN)から応力(Pa)に変換することでプローブ先端の試料表面に対する垂直荷重がどの領域であるのか、どのくらいの垂直荷重で全面接触に至るのかなどを考慮して、マイクロ領域における粘土の摩擦力についてさらに研究を進めたい。

<参考文献>

- 1) 大河原ほか:粘性土の残留強度発現機構に関する基礎的研究,第34回地盤工学会研究発表会講演集2冊分の1,pp.463-464,1999.
- 2) 森田清三 編著:原子・分子のナノ力学,丸善,2003
- 3) Rode,A.A. 著:土壌と水,東京大学出版会,1963.
- 4) Kemper, W.D., and J.B. Rollins. Osmotic efficiency coefficients across compacted clays. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:529-534, 1966.
- 5) 山岡武博:フリクショナルカーブによる定量的摩擦特性評価Ⅰ,2001
- 6) 山岡武博:フリクショナルカーブによる定量的摩擦特性評価Ⅱ,2001
- 7) 井田龍太:マイクロオーダーにおける摩擦特性評価,2004