

すべりで、すべり面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が混在している。また凝灰岩層は認められない。粒度分布、構成粘土鉱物はA地すべりではほぼ均質であり、B地すべりは不均質である。両地すべりとも集水井施工時に、不攪乱試料は一边約30cmの土塊をブロックサンプリングにて採取し、再構成試料はすべり面付近から採取した試料より425 μ mフルイ通過分を予圧密して用いた。

② C地すべり

現場周辺の地質は第三紀層やハッタオマナイ層が広がっており、すべり面は第三紀層とハッタオマナイ層との境界付近であるとみられる。すべり面上位は緑泥石やイライトからなり、すべり面下位は破碎した泥岩で構成されており、すべり面下位の方が上位に比べ新しい時代の地層で出来ており逆転した地層になっている。不攪乱状態の試料は、切り土の面に現われたすべり面付近で、30cm程度に切断したシンウォールチューブを人力で押し込んで採取したもので、再構成状態の試料は下部すべり面付近から採取した試料より425 μ mフルイ通過分を予圧密して用いた。

5. 粒度組成が残留状態せん断抵抗角に及ぼす影響

Fig.1に今回扱った3地すべり試料と過去の研究^{2), 3)}の地すべり試料から得られた粘土含有量と残留状態せん断抵抗角を示す。若干のばらつきはあるものの粘土含有量が増加するとともに残留状態せん断抵抗角は減少傾向にあると言える。この結果は、地すべりの滑動による粒子破碎、地下水の影響による風化や変質、スレーキング等によりすべり面に粘土粒子が生成、集積することによりすべり面強度の低下を招く可能性を示唆する。この考えを基にA、BおよびC地すべりの不攪乱・再構成試料から求めた残留状態せん断抵抗角について以下のように考察した。

A地すべり、C地すべりでは不攪乱試料と再構成試料から

得られた残留状態強度パラメータは近い値を示したが、B地すべりの不攪乱試料と再構成試料により得られた残留状態強度パラメータにはかなりの差異が見られた。この原因として、不攪乱試料のすべり面と再構成試料の粘土含有量の違いが考えられる。B地すべりは不攪乱試料の粘土分が再構成試料の粘土分より卓越していることが原因のひとつと思われる。

B地すべり不攪乱試料について試験後の供試体断面を顕微鏡観察により最大粒径を調べたものをFig.2に示す。Fig.2よりB地すべりの不攪乱試料のせん断面付近の最大粒径は約50 μ mであり、再構成供試体の場合は全体的に約200 μ mであった。一方C地すべりの場合、不攪乱試料の粘土分と再構成試料の粘土分はかなり異なるにもかかわらず、残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r にはB地すべりほどの違いは見られない。これは不攪乱試料の繰り返し一面せん断試験ではすべり面をせん断するように供試体作製をするため、粒度試験で得られる粘土含有量より、せん断強度に影響を及ぼす範囲内では粘土分が多く存在していると考えられ、再構成試料よりも粘土含有量が低いからといって一概に残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r の差異が生まれるとは限らないと考えられる。

したがってA地すべりのような均質な地すべり粘土層を有する地すべりでは、不攪乱試料と再構成試料の試験結果が一致しやすく、B地すべりのような泥岩内部にすべり面が存在し、地すべり粘土層が非常に薄く、その上下部の物性が大きく異なる地すべりでは、不攪乱試料と再構成試料の試験結果が一致しづらいと考えられる。

6. スメクタイト含有量が残留状態せん断抵抗角に及ぼす影響

Fig.3に今回の3つの地すべり試料と過去の研究³⁾で得られたスメクタイト含有量と残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r の関係を示す。スメクタイト含有量はメチレンブルー吸着法により求めており、第2章3-2)にあるモンモリロナイトと今回の試験で求めたスメクタイトは同様の膨潤性粘土鉱物としてみなす。当研究室の過去の値³⁾は山崎らの報告と同様にスメクタイト含有量が増加するにつれ残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r が低下し約30%を超えるあたりから低下が見られなくなる。

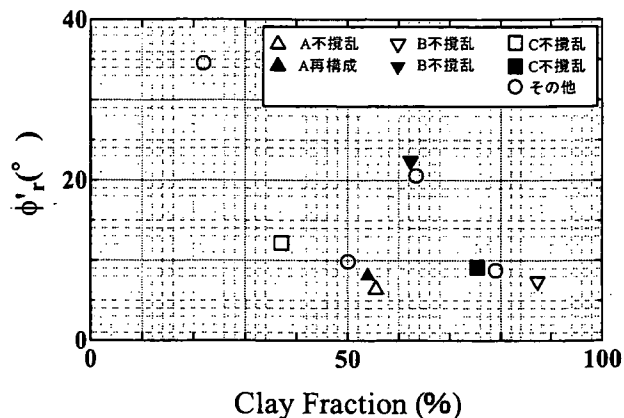


Fig.1 ϕ'_r ~Clay fraction relationship

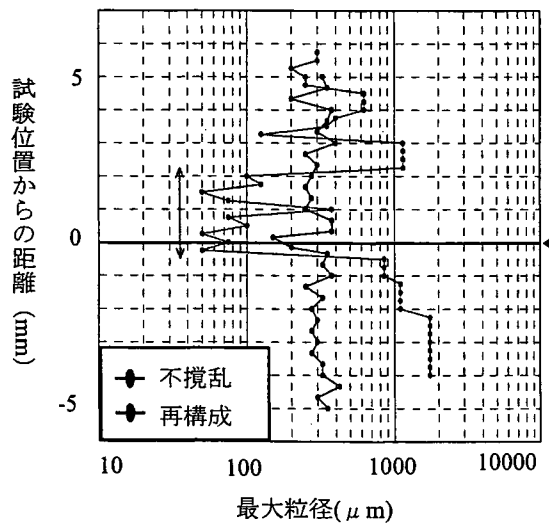


Fig.2 Grain size distribution

今回の A、B、C 地すべり試料については、過去の値に比べ全体的に残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r がスメクタイト含有量に比べて小さいものの同様の傾向を示している。スメクタイト含有量が少ない試料ではそれぞれの試料の構成鉱物の違いや、含まれる砂分の形状や粒径の違いからスメクタイト以外の成分が ϕ'_r に大きく影響し、スメクタイト含有量がある一定量を超えるとスメクタイト固有の ϕ'_r に収束すると考えられる。山崎の試験で用いた試料は純粋なモンモリロナイトとイライトの混合試料によるものであったが、今回の 3 地すべり試料、過去のデータも地すべり粘土であり、自然土においてもスメクタイト含有量と残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r には相関関係が認められ、スメクタイト含有量の測定は残留状態せん断抵抗角 ϕ'_r を推測する一つの指標になり得ると考えられる。

7. 不攪乱試料の供試体作製におけるすべり面と試験位置

Fig.4~Fig.6 は A・B 地すべり、C 地すべりの不攪乱試料を用いた繰り返し一面せん断試験結果のせん断応力(τ)~水平変位(δ)関係の一例を示したものである。Fig.4(a)、Fig.5(a) は繰り返しせん断一回目の $\tau \sim \delta$ 関係とそれ以降の繰り返しせん断における $\tau \sim \delta$ 関係にほとんど差が見られず、ピーク状態せん断強度 τ_p と残留状態せん断強度 τ_r の差が小さい。実際の地すべりでは、過去に大きなせん断変位を経験しているため粒子構造が破壊され、粒子の再配向がほぼ完了していると考えられるため、Fig.4(a)、Fig.5(a)のような $\tau \sim \delta$ 関係を示す場合は、鏡肌面でせん断が行われたケースと考えられる。一方、Fig.4(b) Fig.5(b)では初回のせん断で大きなせん断応力を示したのち、2 回目以降はせん断応力が徐々に減少しており、ピーク状態せん断強度 τ_p と残留状態せん断強度 τ_r の差が大きい。Fig.4(b) Fig.5(b)のような $\tau \sim \delta$ 関係を示す場合は、すべり面粘土内でせん断は行われているが鏡肌面と試験位置が完全には一致していないと考えられる。

B 地すべりの試験後の供試体を用いて薄片処理後の断面写真を Fig.7 に示す。Fig.7(b)より Fig.5(a)の供試体はすべり面と試験位置が一致しており、Fig.7(c)より Fig.5(b)の供試体は

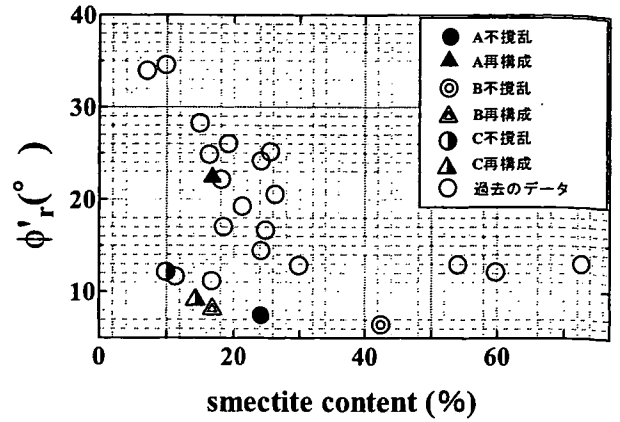


Fig.3 $\phi'_r \sim$ smectite content relationship

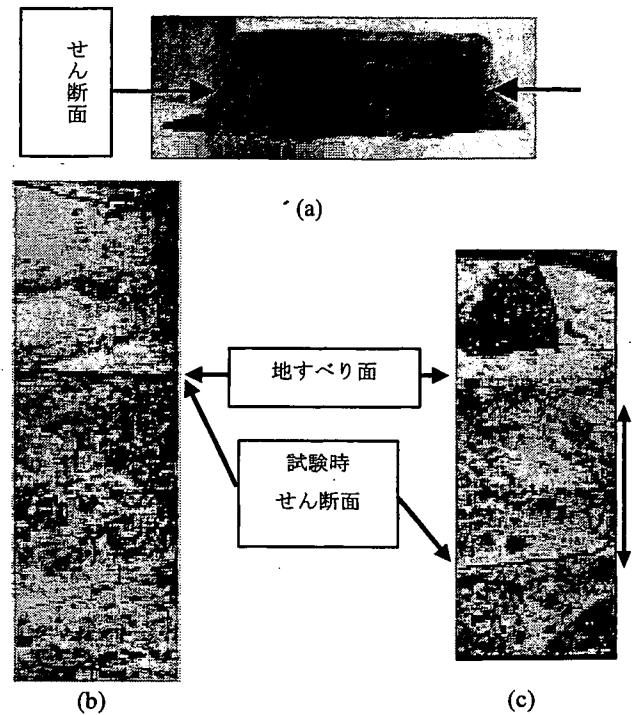


Fig.7 Degree of coincidence of sliding surface with shear plane at the test

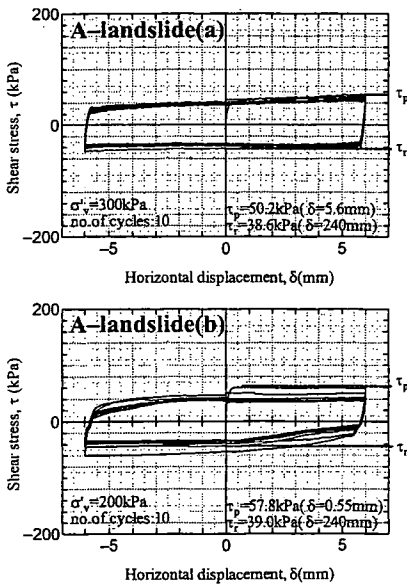


Fig.4(a),(b) $\tau \sim \sigma$ relationship

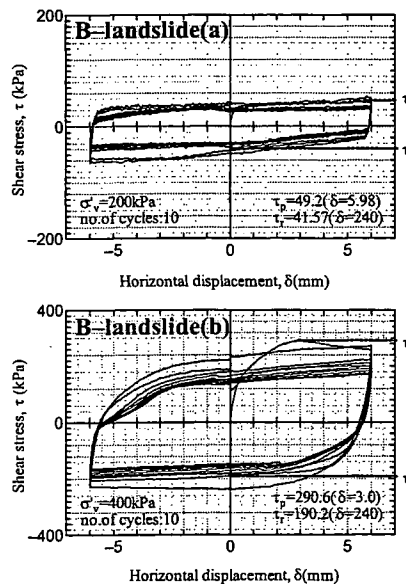


Fig.5(a),(b) $\tau \sim \sigma$ relationship

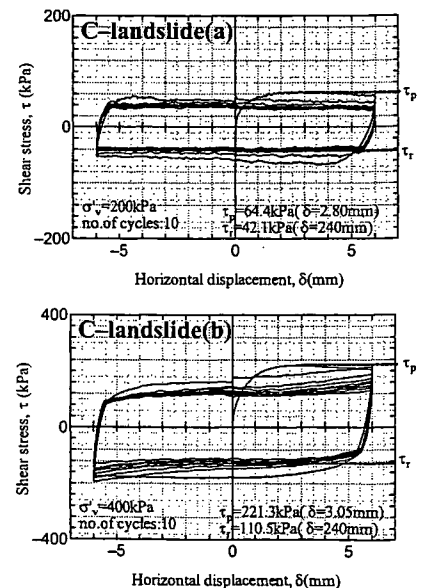


Fig.6(a),(b) $\tau \sim \sigma$ relationship

不一致であったことを確認している。このような理由からC地すべりの Fig.6(a)は Fig.4(a)、Fig.5(a)に比べると若干異なるが、すべり面と試験位置がほぼ一致したと考え、Fig.6(b)は不一致だと判断した。不攪乱試料のすべり面は粘土分が多く含まれるが、少しずれると砂分やレキ分が多くなるため供試体作製の精度によってピーク状態せん断強度パラメータにバラツキが生じやすい。特にすべり面粘土層が薄く、上下の層と大きく物性が異なるような試料の場合は試験後の供試体観察などを用いた確認が重要である。

8. 室内試験を基にした設計強度定数と従来法との比較

Fig.8～Fig.10にA・B地すべり、C地すべり試料の繰り返し一面せん断試験より求めた各種状態強度パラメータを用い、SPLICE 法を適用して求めた設計用強度定数を示す。またSPLICE 法とc=d 法それぞれから求めた設計強度定数を Table 3に示す。

B地すべり、C地すべりにおいて、試験結果から得られた各状態強度パラメータを結んだ線が $c'-\tan \phi'$ 直線と明確に交差しないため設計強度定数は $c'-\tan \phi'$ で囲んだ範囲から算定した。B地すべりの再構成試料から得られた完全軟化・残留強度パラメータは上記に述べたように過剰に大きいと判断し、現場の強度を反映していないと思われるため設計強度定数の算定には用いていない。

SPLICE 法により得られた設計強度定数とc=d 法の設計強度定数と比較すると、A、B、C地すべりのすべてにおいてSPLICE 法により求めた設計強度定数は粘着力 c' が小さく、せん断抵抗角 ϕ' は大きいという結果が得られた。この原因として、SPLICE 法は試験から得られたピーク強度パラメータ、完全軟化強度パラメータ、残留強度パラメータをそれぞれ結んだ線と $c'-\tan \phi'$ 線との交点で設計用強度定数を決めるが、今回の試料から得られたピーク強度パラメータ (C地すべりは未定) はいずれも比較的小さかった結果、交点の座標値はc=d 法に比べて右下方に位置することになる。すなわちピーク強度パラメータが小さい場合、ピーク・完全軟化・残留強度パラメータをそれぞれ結んだ線と $c'-\tan \phi'$ 線との交点は、粘着力 c' は小さく、せん断抵抗角 ϕ' は大きくなる。

なお、ピーク強度パラメータが小さいのは第7章で述べたように、不攪乱試料の供試体作製にあたって現場のすべり面に可能な限り近づけてせん断するようにしたため、今回求めたピーク強度パラメータは過去の滑動によって一旦残留状態に近づきその後の回復により増大した強度に相当する。したがって、今回の求めたピーク強度パラメータと残留強度パラメータとを結ぶ線の周辺に現場すべり面の平均的な強度があると考えられることからSPLICE 法の趣旨に適合し、決定した設計用強度定数は十分な精度を持つものとみることができる。

Table 3 Design strength

	A地すべり		B地すべり		C地すべり	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
SPLICE 法	7.0	14.0	16.6	13.6	2.6	11.1
c=d 法	15.0	9.1	25.0	11.3	10.0	6.1

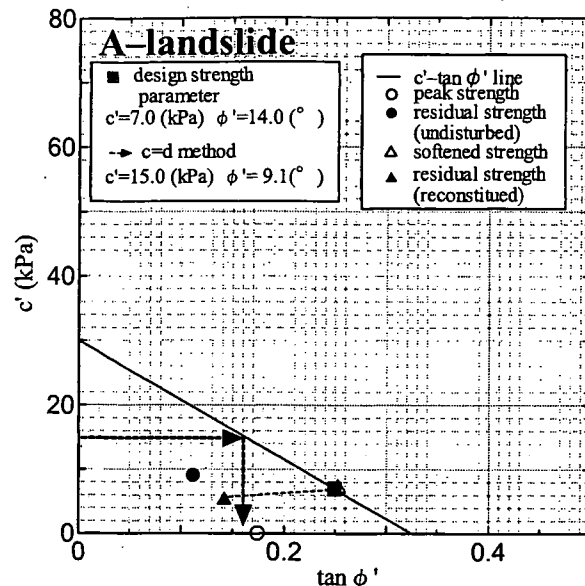


Fig.8 $c'-\tan \phi'$ relationship

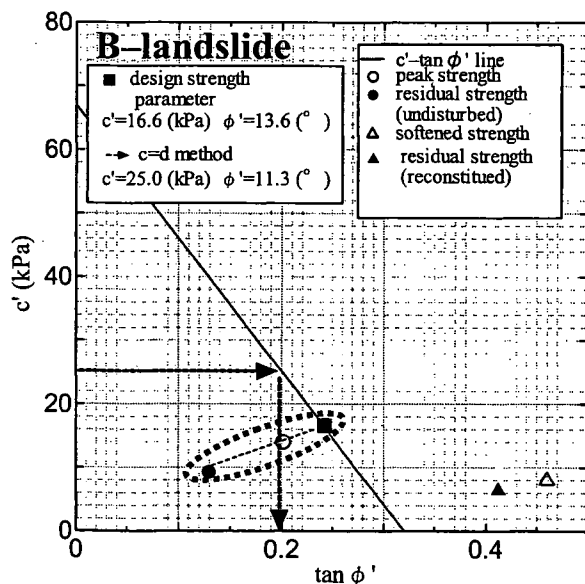


Fig.9 $c'-\tan \phi'$ relationship

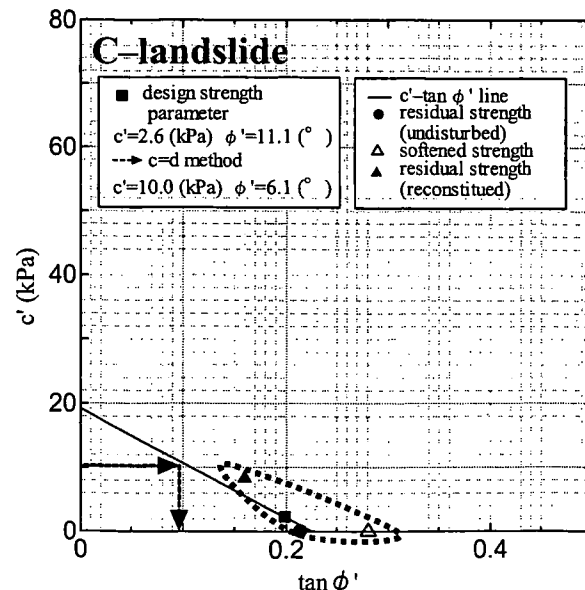


Fig.10 $c'-\tan \phi'$ relationship

9.まとめ

これまで $c = d$ 法が多くの現場で用いられてきた背景として、迅速かつ簡単に設計用強度定数の決定が出来、誰でも同じ結果を得られることが挙げられる。ただし、その前提条件は想定したすべり面の位置が正確であることと、 $c = d$ とする経験則が常に成立することである。

室内試験結果に基づく設計強度定数決定法は $c = d$ 法より簡便さに欠けるが、上述のような強度パラメータに及ぼす要因を考慮することで理論的に現場の地すべりの強度パラメータを正確に求めることが可能であり、地すべり対策工設計用強度定数の決定法として有用である。

<参考文献>

- 1) Mitachi, T., Kuda, T., Okawara, M. and Ishibashi, M.: Determination of strength parameter for landslide slope stability analysis by laboratory test and inverse calculation engagement, 地すべり学会誌, Vol.40, No.2, pp.1-12, 2003.
- 2) 石橋正弘・三田地利之・九田敬行・伊藤裕之: 逆算法と室内試験による地すべり対策工設計用強度パラメータの決定法, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 43 号, pp.249-254, 2003.
- 3) 伊藤裕之・三田地利之・鷺隼人: 繰り返し一面せん断試験による残留強度に及ぼす諸要因と強度パラメータの評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 44 号, pp.241-246, 2004.
- 4) Skempton, A.W. : Residual Strength of Clay in Land-slides, Folded Strata and the Laboratory, Geotechnique, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985
- 5) 山崎考成: 再活動地すべりにおけるせん断帯の構造と土質特性に関する研究, 佐賀大学博士論文, 2000.
- 6) 鷺隼人・三田地利之・高橋秀彰・梅谷晋平: 繰り返し一面せん断試験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, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 45 号, pp.1-6, 2005.

遠心場における降雨再現実験での間隙水圧の挙動

北海道大学大学院○学生会員 笠間太樹
北海道大学工学部 学生会員 金子広明
北海道大学大学院 正 会 員 田中洋行
北海道大学大学院 正 会 員 工 藤 豊

1.はじめに

近年、異常気象による豪雨が多発し、それに伴い多数の斜面崩壊災害が起こっている。豪雨による斜面崩壊は、斜面表層を流れる水が溝となり周囲を洗掘していくガリ浸食を除いて、雨水が斜面内に浸透することで発生する。この崩壊メカニズムは大まかに分けて2種類に分類され、①風化境界面などの透水性の低い不連続面上に地下水面（浸潤面）が形成され、間隙水圧が発生して崩壊に至るもの、②降雨浸透によってサクシオンが低下し、見掛けの粘着力が小さくなって斜面崩壊が発生するもの、とが考えられる。①の飽和状態で発生する斜面崩壊のメカニズムについては、これまで数々の研究が行われ、解析法も確立されているが、②の不飽和状態で発生する斜面崩壊についてはまだ研究不足であり、有効な解析法も確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、コストと時間のかかる大規模な実大実験の代わりに、遠心模型実験装置を用いた縮小模型において豪雨時の不飽和地盤を再現し、その斜面崩壊のメカニズムを明らかにした。小規模な模型地盤を用いた遠心模型実験が適用可能であることを実証できれば、この実験方法は豪雨時の斜面崩壊メカニズム解明に大きく貢献できる。このためには、遠心力場において間隙水圧計を用いて間隙水圧、もしくはサクシオンを計測し、降雨強度と降雨時間、遠心加速度などとの相関関係を調べ、遠心模型実験に必要な相似則の確立が必要不可欠となる。

2.実験概要

本研究は昨年度からの継続実験であり、昨年度の研究報告は阿部、他¹⁾によって報告済みである。昨年度は豊浦標準砂 ($\rho_s=2.62\text{g/cm}^3$)のみを使って飽和度 50%の不飽和地盤を作製し、平面地盤、斜面地盤に対して散水実験を行った。しかし、サクシオンの計測はできなかったため、本研究では、模型地盤の透水性を下げる目的で豊浦標準砂に笠岡粘土 ($\rho_s=2.77\text{g/cm}^3$)を混入させたものを使用して実験を行っている。

不飽和土の透水係数を厳密に知るためにはサクシオンをコントロールして不飽和透水試験を行わなければならないが、本実験では通常の透水試験を利用した簡略な方法で透水係数を求めた。その結果によると、豊浦砂 100%の地盤に比べ、粘土分を 2.5%増やしていくごとに透水係数がおおよそ 10^{-1}cm/s ずつ下がっていくことがわかった。試験に用いた供試体は事前に締め固め試験を行い、得られた締め固め曲線から飽和度 50%になるように含水比を調整して供試体を作製した。

実験は、粘土分を 5%および 7.5%含んだ試料を用いて平面地盤実験を、粘土分を 5%含んだ試料を用いて斜面地盤実験を行った。平面地盤実験では、間隙水圧計を所定の深さに設置して、高さ 20cm まで試料を締め固めて模型地盤を作製した。模型地盤完成後、所定の遠心加速度を間隙水圧の値が安定するまで載荷し、安定した後、散水実験を行った。斜面実験では、平面地盤と同様に高さ 20cm まで試料を締め固めた後、斜面を削り出すことで模型地盤を作製した。斜面地盤の寸法は、昨年度¹⁾と同様の斜面角度 45° 、斜面高さ 15cm で実験を行った。

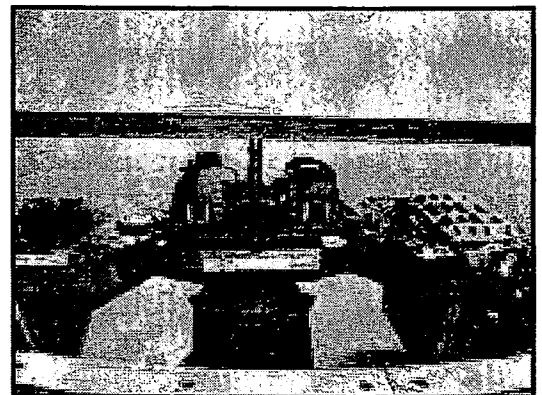


図-1 遠心模型実験装置

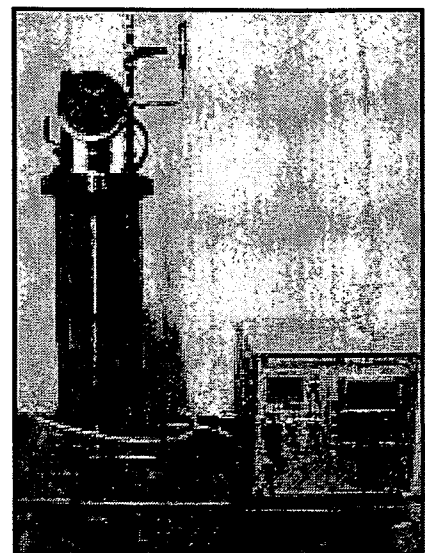


図-2 散水装置

Behavior of pore water pressure induced by rain-fall under centrifugal field

T.Kasama, H.Kaneko, H.Tanaka, Y.Kudo (Hokkaido Univ)

3. 実験装置

i) 遠心模型実験装置 (図-1)・・・実験に用いた装置の最大積載質量は 150kg, 有効回転半径は 1.5m, 最大回転半径における最大遠心加速度は 150G である。模型土槽前面には CCD カメラを 2 基設置しており, カメラの映像はスリッリングを介して, また間隙水圧計などの計測機器類のデータはワイヤレスデータロガーを用いて無線で, それぞれ制御室に伝送される。使用した模型土槽の大きさは, 高さ 40cm, 幅 45cm, 奥行き 20cm である。

ii) 散水装置 (図-2)・・・遠心模型実験装置内の模型土槽に水を送るための給水装置と, 水を霧状に散布できる散水バルブが合計 3 取り付けられた噴霧蓋, の 2 つからなる。噴霧蓋は模型土槽上部に固定し, 給水装置は遠心模型実験装置の外に設置してある。

4. 実験結果と考察

1. 平面地盤実験

<実験①(粘土分 5%)>

笠岡粘土 5%, 豊浦標準砂 95% で混合した試料 (含水比 13%, 飽和度 50%) を用いて, 高さ 20cm の模型地盤を作製し, 地盤底部から 5cm ごとに間隙水圧計を設置した。この地盤に対して, 遠心加速度 20G, 散水強度 200mm/h, 散水量 $2.5 \times 10^3 \text{cm}^3$ で散水実験を行った。散水開始からの間隙水圧の変化を図-3 に, 地下水位の変化を図-5 の左に示す。

深さ 20cm, 15cm, 10cm において間隙水圧が上昇し始めるタイミングがほぼ同時であったことは, 散水された水が層を作って一様な速度で地盤内を浸透していったことを示している。また, 深さ 10cm において散水前に -2kPa のサクションが計測された。地下水位の変化を見ると地下水面以下では静水圧分布に近い三角形分布が得られていることがわかる。

<実験②(粘土分 7.5%)>

笠岡粘土 7.5%, 豊浦標準砂 92.5% で混合した試料 (含水比 12.5%, 飽和度 50%) を用いて, 粘土分 5% の平面地盤実験とほぼ同様の実験を行った。実験条件が異なる点は, 間隙水圧計の設置間隔を 5cm から 2.5cm にしたこと, 散水量を 2.5L から 1.5L に減らしたことである。散水開始からの間隙水圧の変化を図-4 に, 地下水位の変化を図-5 の右に示す。

散水開始から, 深さ 20cm における間隙水圧が上昇するまでの時間 (グラフ内に "Lag" と表示) は, 粘土分 5% では約 70s であったのに対し, 粘土分 7.5% では約 120s であった。また散水開始からすぐに地盤表面に水が溜まっていたことが CCD カメラの映像から観察できたことから, この実験条件では透水係数が低く, 浸透に時間がかかることがわかる。

粘土分 5% と同様に, 散水前から地下水面以下にあった深さ 20cm, 15cm, 12.5cm では上昇のタイミングがほぼ同時であった。深さ 2.5cm において -6kPa , 深さ 7.5cm において -2kPa のサクションが計測され, 散水が開始されると徐々に正に転じていく, つまりサクションが消散していく様子が観察された。

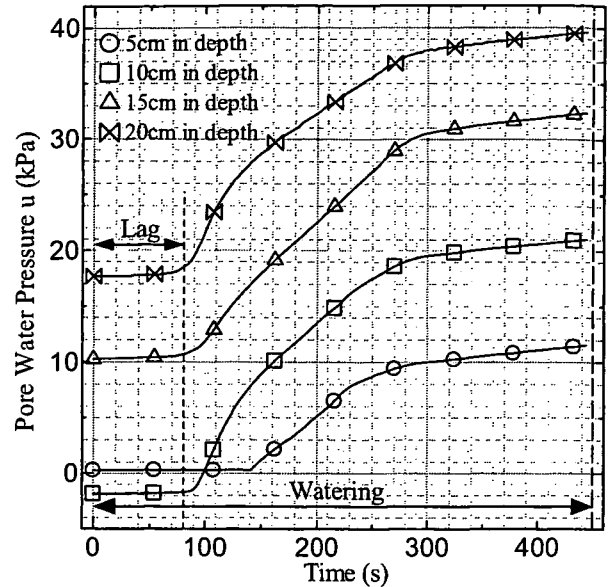


図-3 間隙水圧変化 (実験①)

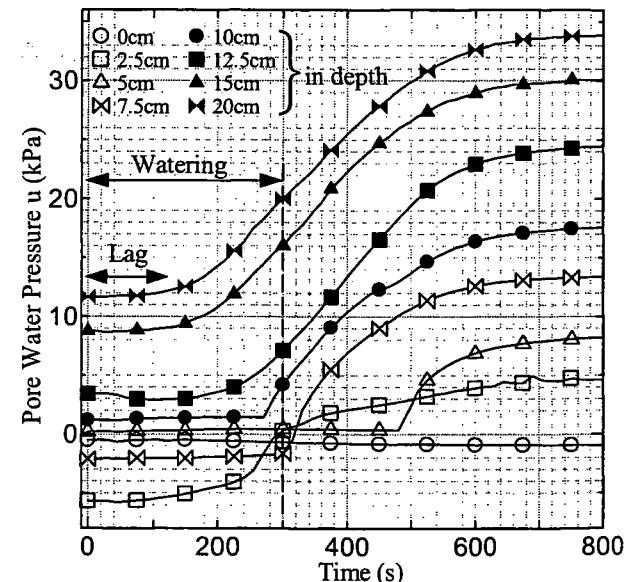


図-4 間隙水圧変化 (実験②)

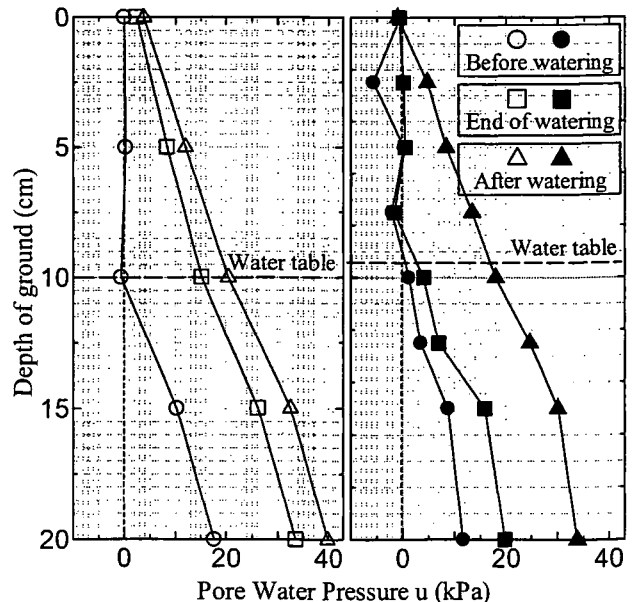


図-5 深さ方向の間隙水圧分布
(左: 実験① 右: 実験②)

II. 斜面地盤実験

平面地盤実験①で用いた粘土分 5%の試料で斜面高さ 15cm, 斜面角 45° の斜面地盤を作製し, 20G 場において散水強度 200mm/h, 散水量 1L で散水実験を行った。法尻部分に水が溜まるのが予想されたので, 法尻方向の土槽側面に排水口を設け (図-6 中 Drain Outlet), 土槽外部の排水槽に排水できるようにした。実験は間隙水圧計の設置位置を変えて計 2 回行い, 以後それぞれ実験①, 実験②とする。模型寸法と間隙水圧計の設置位置を図-6, 散水開始からの間隙水圧変化を図-7, 地下水面以下の間隙水圧計の値から求めた地下水位の変化を図-8, 実験後の地盤を 8 ブロックに分けて含水比の分布を表したものを図-9 に示す。

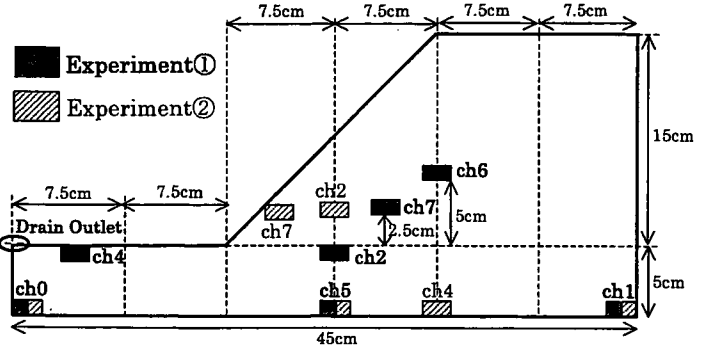


図-6 模型寸法と間隙水圧計設置位置

実験①で法尻表面に設置した ch4, 実験①, ②で排水口下部に設置した ch0 の値がほぼ変化しなかったことや, CCD カメラの映像から法尻部分に水は溜まっている様子は見られなかったことなどから, 排水は問題なく行われていることが確認できた。また, 間隙水圧計のうち, 実験①, ②で同じ位置に設置したものは ch0, ch1, ch5 である。これらを実験①と実験②で比較すると, 散水前と散水後に安定した時はほぼ同値であるが, 散水開始後の変化は実験②の方が早く反応し, また上昇速度も大きくなっている。同条件で供試体を作製したにもかかわらず, 散水時の間隙水圧の変化に差異が生じた原因は, 散水パルプの性能にあり, 一様に散水できなかったためと考えられる。

散水開始直前, 斜面部の地下水位が最高点に達した時点 (実験①では散水開始から 320 秒後, 実験②では 270s 後), および散水が終了して地下水位が下がって安定した時点の地下水位の位置をプロットした (図-8)。実験①, 実験②ともに散水によって水位の上昇が続き, 散水終了後しばらくしてから最高点に達し, 徐々に水位が下がっていく (排水されていく) 傾向が見られた。また, 地下水面が最終的に安定した位置は, 散水前の地下水面の位置とほぼ一致した。

地下水面の形状は, 散水前, 散水後安定した時 (図-8 中の○, △) では凹曲線分布となっている。凹曲線状となるのは, 遠心加速度の大きさが回転軸からの距離によって異なるため, 回転の中心から見て円弧状になるからである。それに対して散水してから一時的に (□), 斜面下部分では凸曲線状の地下水面形状となっていることが分かる。これは地下水面まで浸透した水が水平方向に移動する速度より, 鉛直方向に浸透する速度が速いためと思われる。

実験後の含水比分布を見てみると (図-9 参照), 地下水面以下であったと思われる深さ 15~20cm の 3 ブロックでは 15~16% となった。この含水比から飽和度を求めると, 59~64% となり, 間隙中の空気が抜けずに残っていることが分かる。また, 地下水面以上では含水比が 9~10% で, 飽和度にするると 36~40% であった。

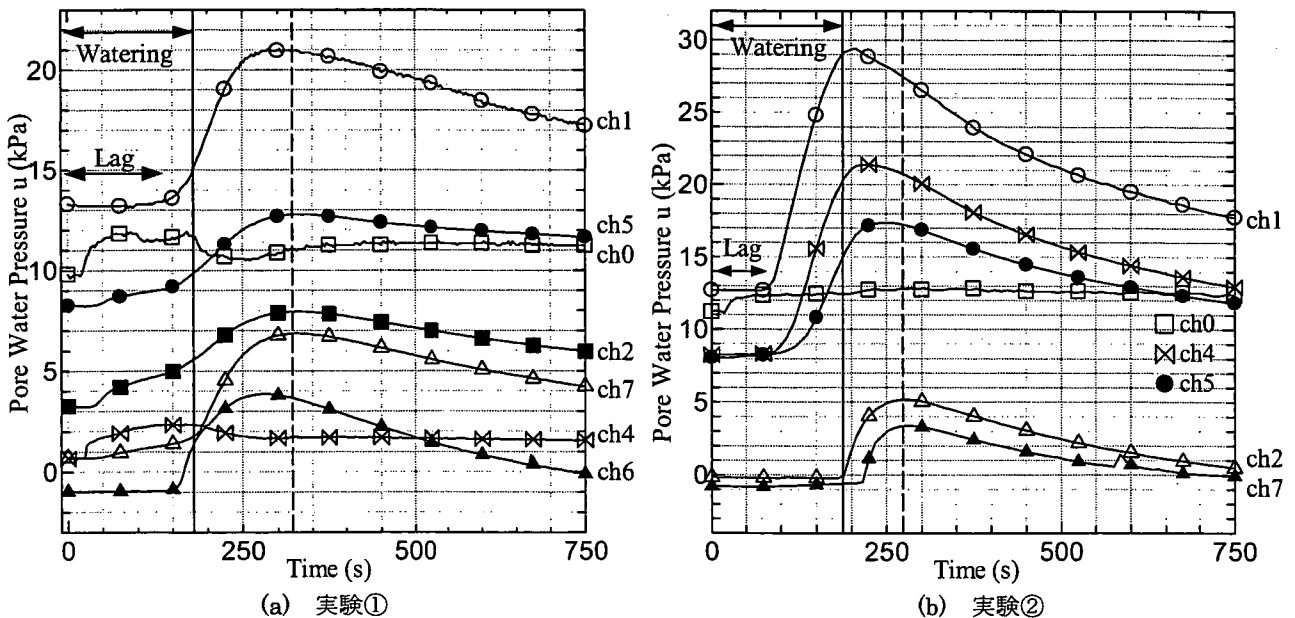
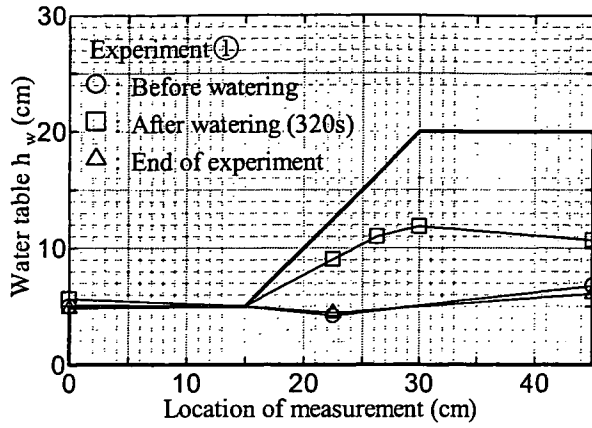
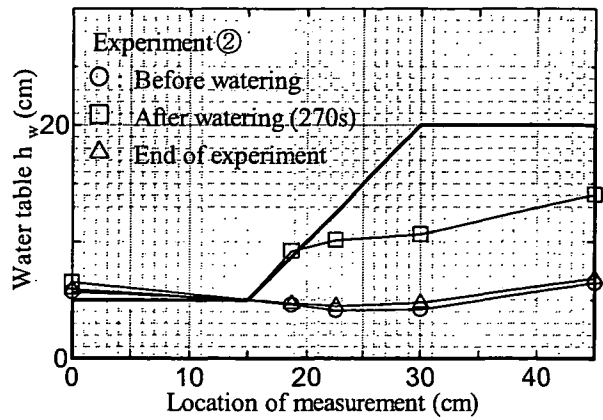


図-7 間隙水圧変化



(a) 実験①



(b) 実験②

図-8 地下水面変化

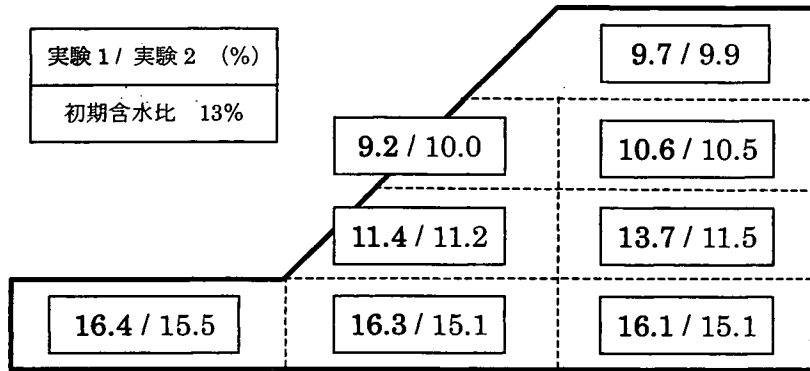


図-9 含水比変化

5. 結論

① 平面地盤実験の結果について

- ・ 地下水面以下では静水圧分布に近い三角形分布が、地下水面以上ではサクシオンが計測された。このサクシオンは散水によって消失することが確認された。
- ・ 粘土分 5% よりも粘土分 7.5% の実験の方が、サクシオンが大きく出ていることが分かる。すなわち地盤の透水係数が小さくなるにつれサクシオンは大きくなる。

② 斜面地盤実験の結果について

- ・ CCD カメラからの映像では地下水位の位置を把握することはできなかったが、間隙水圧計の値から、地下水位のおおよその位置を推定できることが分かった。
- ・ 地下水面形状は、安定している時は凹曲線状だが、散水中は凸曲線状になり、重力場での地下水面形状に近づく。
- ・ 地下水面以下にあった深さ 15~20cm の含水比から飽和度を算出すると 60% 前後となり、散水を行っても間隙空気が上方向に抜けていないことが分かった。

《参考文献》

- 1) 阿部篤史, 他: 遠心場における不飽和地盤の挙動, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, 第46号, pp. 129-132, 2006

原子間力顕微鏡による異なる温度条件下での高純度粘土の摩擦力・粘性係数測定

岩手大学大学院 ○学生会員 久 常 雄大
 岩 手 大 学 国際会員 大河原 正文
 北海道大学大学院 国際会員 三田地 利之

1. はじめに

粘土の残留強度とは、大きなせん断変形を受けて残留状態に至った時点での最小せん断強度で鏡肌を呈する地すべりのすべり面強度に相当するとされている。残留状態に至ったせん断面はせん断方向への粒子配向がほぼ終了していることから、残留状態でのせん断現象は平滑な粘土粒子表面間の摩擦現象であると理解される¹⁾。従来、粘土の残留強度は主として一面せん断試験や三軸試験などの室内要素試験によりセンチメートルオーダーの供試体を対象として求められている。

ところで、マイクロからナノサイズでの表面の物性を測定することができる装置として原子間力顕微鏡がある。原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) は、試料表面にマイクロサイズの探針を接触させスキャンすることにより、原子サイズの形態情報などを測定する装置である。AFMにおいて注目すべきは、試料表面の摩擦力や様々な物性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粘弾性を直接測定できる。したがって、室内要素試験による残留強度をマクロな摩擦力、AFMによる摩擦力をマイクロな摩擦力と考えることができよう。本研究では、粘土の残留強度発現機構を解明するためのアプローチとして、AFMにより粘土粒子表面の物性を測定し、粘土のマイクロ領域における摩擦特性を検討した。

AFM²⁾とは、カンチレバーと呼ばれる小さな突起先端 (探針) と試料表面の間に働く原子間力をカンチレバーの変形として測定する顕微鏡である。本研究で使用した AFM は図1に示した通り、カンチレバーの背面に斜めからレーザー光を照射して、カンチレバーの変形に伴う光の反射角変化を測定する光てこ方式と呼ばれる装置である。また、本研究では対象物の物性と測定項目を考慮して、動作方式はコンタクトモード、液中コンタクトモード、タッピングモードとした。コンタクトモードは探針を試料表面に接触させて直接スキャンし、カンチレバーのたわみやねじれから試料表面の凹凸情報および摩擦力を測定する動作方式である。液中コンタクトモードはコンタクトモードと基本的に同じであるが、試料を水または溶液で覆うことで液中での物性を測定できる。タッピングモードはカンチレバーに一定の周期で振幅を与え、試料表面に探針を周期的に接触させることで試料表面への破壊を最小限に抑えるとともに、カンチレバーの振幅の変化から試料表面の凹凸情報および粘弾性情報などを得ることができる。図2に各動作方式の測定原理を示す。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。

本研究の目的は、①粘土の高湿度条件下および液中での摩擦力の測定、②異なる温度条件下での粘土の摩擦力の測定、③異なる温度条件下での粘土の粘性測定である。

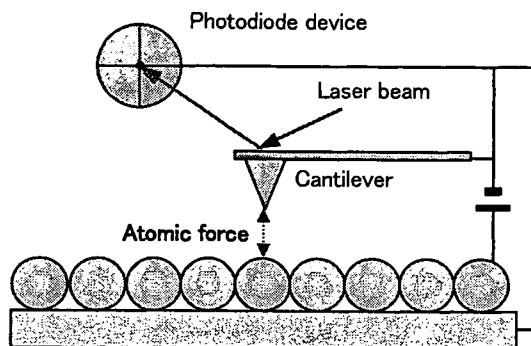


図1 原子間力顕微鏡の動作原理



写真1 原子間力顕微鏡

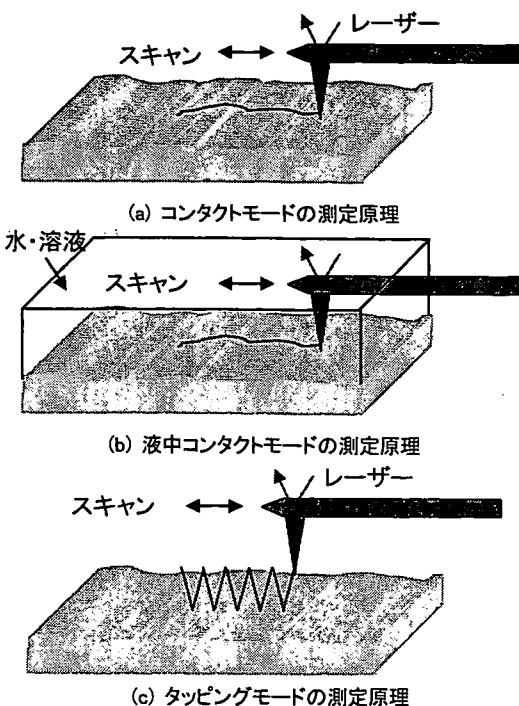
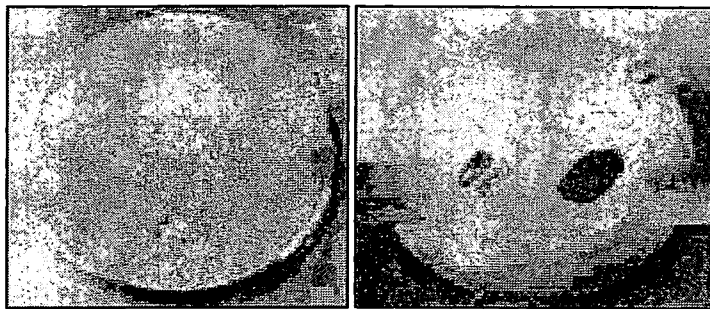


図2 AFMの動作方式の原理

2. 試料および試料作製

試料には、Na-montmorillonite を主成分とするクニピア-F (クニミネ工業), Ca-montmorillonite を主成分とするクニボンド (クニミネ工業), Kaolinite を主成分とするカオリン-KH (カナヤ興産), Pyrophyllite を主成分とする勝光山パイロフィライト (日本粘土学会参考試料) を用いた。図4～図7に4種類の粘土鉱物のX線回折パターンを示す。

AFM 測定用試料の作製にあたり摩擦測定では試料表面が均一で凹凸の少ない試料表面が好ましいため、摩擦測定用として粘土の水溶液をシリコンウエハ基盤に滴下し、室温で乾燥させたものを試料とした。とくに液中コンタクトモードでは、蒸留水を滴下したときに粘土が基盤から離れないように試料を厚くした。粘弾性測定では、測定対象物(粘土鉱物)と比較となる基盤表面を同時に測定する必要があるため、基盤上に小さな粘土粒子が点在していることが好ましい。基盤には清浄なシリコンウエハを用意し、粘土に蒸留水を加えて攪拌したものを試料の厚さに注意してシリコンウエハに擦りつけ室温で乾燥させたものを試料とした。写真2に摩擦測定用および粘弾性測定用試料を示す。



(a) 摩擦測定用

(b) 粘弾性測定用

写真2 AFM 測定試料

3. 測定方法

(1) AFM 測定中の温度および湿度の制御

試料の表面温度を制御するため、シリコンラバーヒーターおよび温度コントローラーを用いた。シリコンラバーヒーターは電気を流すことで発熱するヒーターである。シリコンウエハ基盤の背面にヒーターを接着し温度コントローラーとヒーターとを接続した。温度コントローラーに付属する温度センサーで基盤の表面温度を測定し、目的の表面温度になるように温度コントローラーにより制御した。

コンタクトモードによる摩擦測定とタッピングモードによる粘弾性測定において、試料表面の乾燥を防ぐとともに試料表面が一定の含水状態を保つために湿度を85～95%の範囲で制御した。湿度の制御は加湿のみで行った。図8に示したとおりAFMの測定部分をシートで覆い、隙間から湿度計のセンサーと加湿器のホースを差し込む。湿度計で測定室の湿度を測定し、加湿器の湿度調節つまみを回して湿度を制御した。写真3は温度および湿度制御中のAFM測定室の様子である。

(2) 粘土の摩擦測定

湿潤粘土を対象に、AFM 測定室の湿度を90%に制御した状態、ならびに試料表面に蒸留水を滴下した状態(湿度100%以上)で粒子表面の摩擦力を測定した。測定モードは、それぞれコンタクトモードおよび液中コンタクトモードである。さらに、湿度のみならず温度も設定し、試料ステージの表面温度をそれぞれ20℃、30℃、40℃とした。また、垂直力と摩擦力との関係から摩擦係数 $\mu_{\text{潤滑}}$ を求め、乾燥粘土の

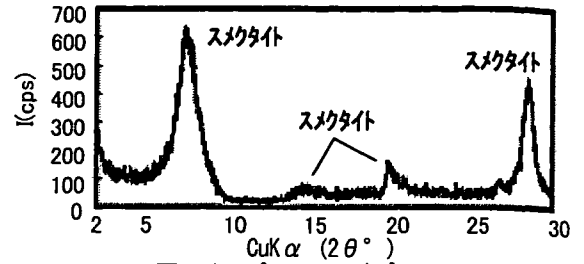


図4 クニピア-FのX線プロファイル

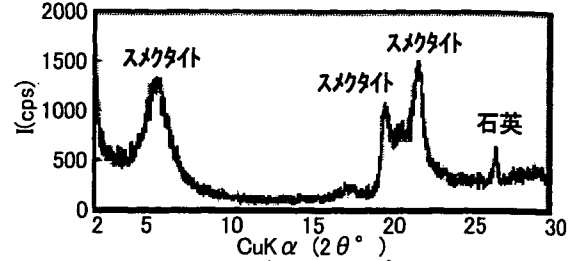


図5 クニボンドのX線プロファイル

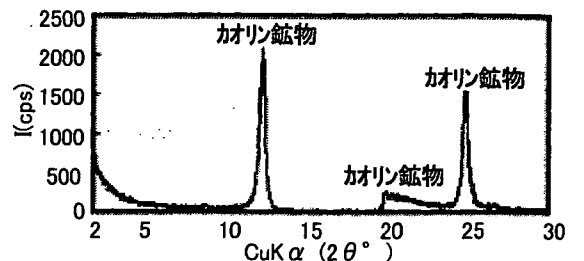


図6 カオリン-KHのX線プロファイル

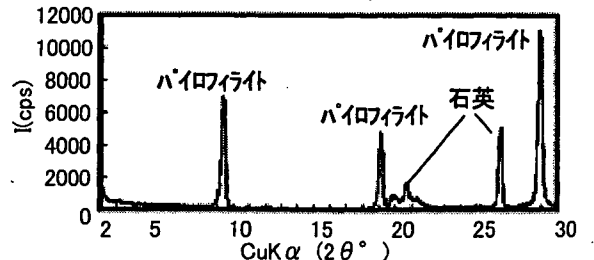


図7 勝光山パイロフィライトのX線プロファイル

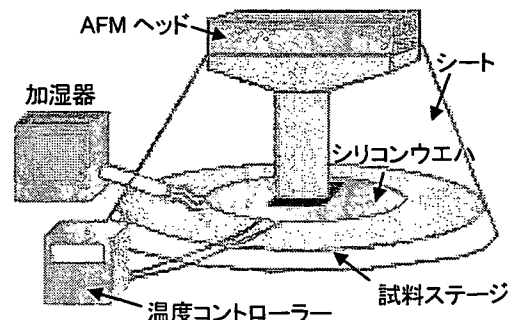


図8 温度および湿度制御の模式図

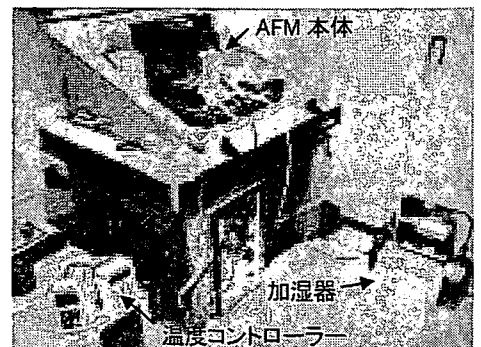


写真3 温度湿度制御したAFM測定室

μ 乾燥と比較した。試料はクニピア F, クニボンド, カオリン KH および勝光山パイロフィライトである。測定条件は、測定範囲 $5\mu\text{m}$ の 1 スキャンライン固定とし、スキャン速度は $8.3\mu\text{m}/\text{sec}$ である。凹凸情報を得るたわみと摩擦情報を得るねじれを分離するためにスキャン角度を 90° とした。また、垂直荷重を変えるために Deflection Setpoint を $0\sim 1.0\text{V}$ の範囲で変化させた。測定データは高さおよび摩擦力である。プローブは Cont (ナノワールド社) を使用した。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し、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) 粘土の粘弾性測定

湿潤粘土を対象に、試料ステージの表面温度を 20°C , 30°C , 40°C に制御した状態で粘土粒子表面の粘弾性を測定した。粘弾性は AFM 探針をタッピング方式で動作させたときの探針の位相遅れにより測定される。図 3 は粘性の異なる物質を測定したときの位相差を模式的に表したものである。粘性が高い物質ほど位相が遅れる。

測定に用いた試料はクニピア F, クニボンド, カオリン KH および勝光山パイロフィライトである。測定範囲は $10\times 10\mu\text{m}$, プローブは NCH (ナノワールド社) を使用した。測定手順は、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し、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および位相像を得た。これら位相像から画像解析ソフトにより位相遅れのヒストグラムを作成し、ヒストグラムのピーク値から位相差を得た。

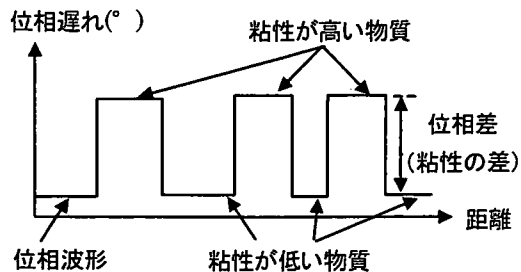


図 3 粘性の異なる物質における位相測定

4. 測定結果および考察

(1) コンタクトモードによる粘土の摩擦力測定

図 9～図 12 にクニピア F, クニボンド, カオリン KH および勝光山パイロフィライトの垂直荷重 - 摩擦力関係を示す。垂直荷重はフォース・カーブ測定により算出した。摩擦力については使用した AFM に力(nN)に換算する機能がないため、既存の研究³⁾において摩擦力が得られているシリコンウエハの表面を測定し、得られた電圧(mV)から換算係数(力/電圧)を求め、測定値(電圧)にこの換算係数を乗じることで摩擦力を算出した。

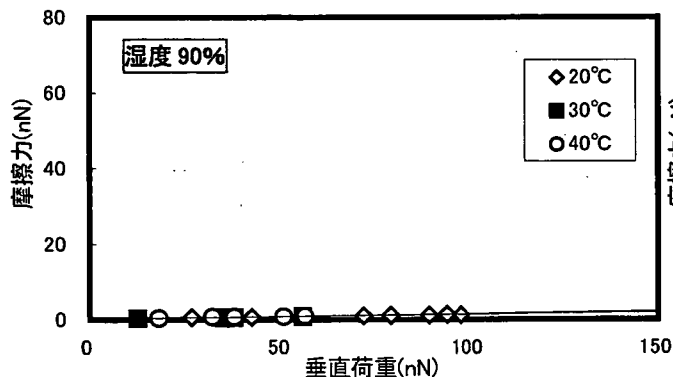


図 9 クニピア F の垂直荷重-摩擦力関係図

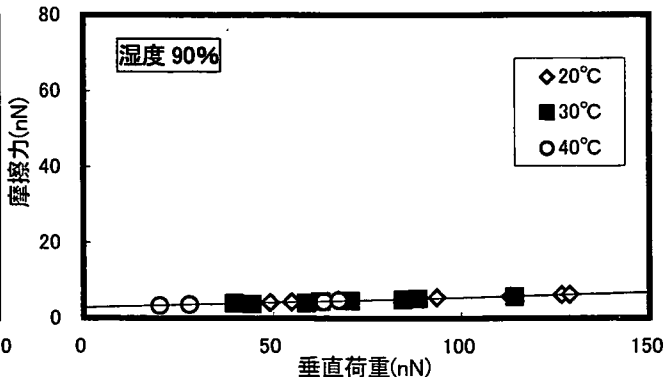


図 10 クニボンドの垂直荷重-摩擦力関係図

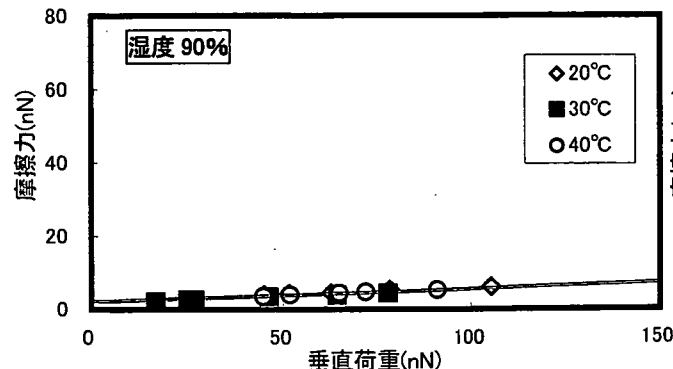


図 11 カオリン KH の垂直荷重-摩擦力関係図

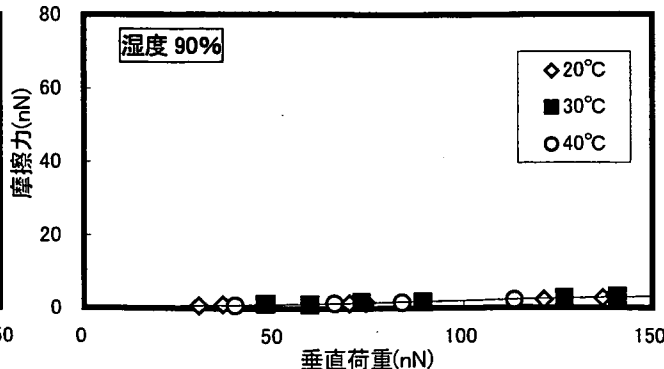


図 12 勝光山パイロフィライトの垂直荷重-摩擦力関係図

測定結果から全ての粘土において摩擦力と垂直荷重に比例関係が認められた。表 1 に摩擦係数 μ を示す。表に示されたように摩擦係数 μ は、全ての温度条件においてクニピア F、勝光山パイロフィライト、クニボンド、カオリン KH の順に大きい。次に試料ごとに温度と摩擦係数 μ との関係を見ると、いずれの粘土も温度が高くなるのに伴い摩擦係数 μ が大きくなる。乾燥粘土の摩擦係数 μ は、クニピア F が $\mu_{乾燥}=0.027$ 、クニボンドが $\mu_{乾燥}=0.053$ 、カオリン KH が $\mu_{乾燥}=0.065$ である⁴⁾。湿度 90% での粘土の摩擦係数 μ は乾燥状態より大幅に小さい。この結果は、マクロ領域での大変位一面せん断試験による湿潤粘土のせん断抵抗角 ϕ'_s が乾燥粘土よりも小さくなるという結果と一致する⁵⁾。

(2) 液中コンタクトモードによる粘土の摩擦力測定

図 13、図 14 に液中コンタクトモードによるクニピア F および勝光山パイロフィライトの垂直荷重 - 摩擦力関係を示す。なお、クニボンドおよびカオリン KH については、液中観察を行うために蒸留水を試料に滴下したところ粘土が溶け出したため AFM 測定を断念した。

測定結果からクニピア F、勝光山パイロフィライトともに摩擦力と垂直荷重に比例関係が認められた。表 2 に温度ごとの摩擦係数 μ を示す。表に示されたように湿度 90% での摩擦力よりも小さい値となった。

次に摩擦係数 μ と温度との関係については、クニピア F、勝光山パイロフィライトともに温度が高くなるのに伴い摩擦係数 μ は大きくなっている。

(3) 粘土の粘弾性測定

図 15 にクニピア F、クニボンド、カオリン KH および勝光山パイロフィライトの位相像を示す。なお、粘弾性の測定においては、AFM 測定室の湿度を約 90% に保ち、試料ステージを 20°C、30°C、40°C に制御した。液中測定については使用した AFM には機能がないため測定していない。なお、図中に温度とスキャン速度 (Scan Rate :SR) を示す。

図 15 において位相像の白色部分は粘土粒子表面で、黒色部分はシリコンウエハである。白色部分の粘土粒子は、試料によって明暗の異なるグラデーションがみられ、粘性が一定でないことがわかる。図 16 は位相遅れのヒストグラムである。表に示されたピーク値は、ヒストグラムの最高値である。シリコンウエハの位相遅れについては温度に関わらずほぼ 0° (シリコンウエハの粘性はゼロ) であるため、粘土の位相差がそのまま粘土の粘性を表している。表 3 は温度ごとの粘土粒子表面とシリコンウエハとの位相差である。表から全ての粘土において位相差が減少している。位相差の減少は粘性の低下を示す。したがって、粘土粒子表面の粘性は温度上昇に伴い低下したことになる。10°C の温度上昇に伴う位相差の減少はクニピア F で平均 3.7°、クニボンドで平均 5.7°、カオリン KH で平均 13.7°、勝光山パイロフィライトで平均 28.0° であった。

表 1 異なる温度での粘土の摩擦係数 μ (湿度 90%)

試料名	20°C	30°C	40°C
クニピア F	0.011	0.013	0.014
クニボンド	0.025	0.026	0.028
カオリン KH	0.034	0.036	0.038
勝光山パイロフィライト	0.018	0.020	0.021

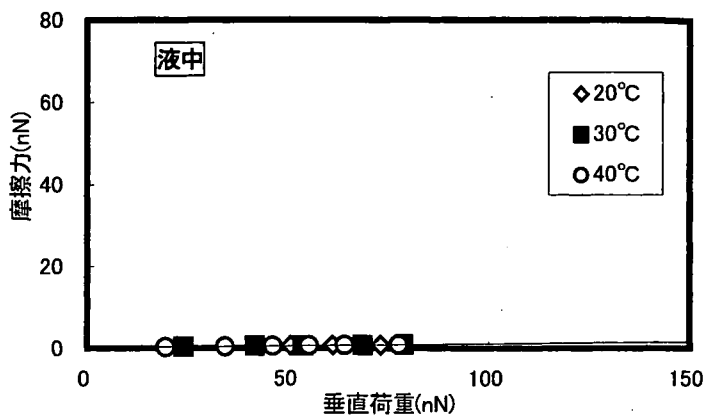


図 13 クニピア F の垂直荷重-摩擦力関係図

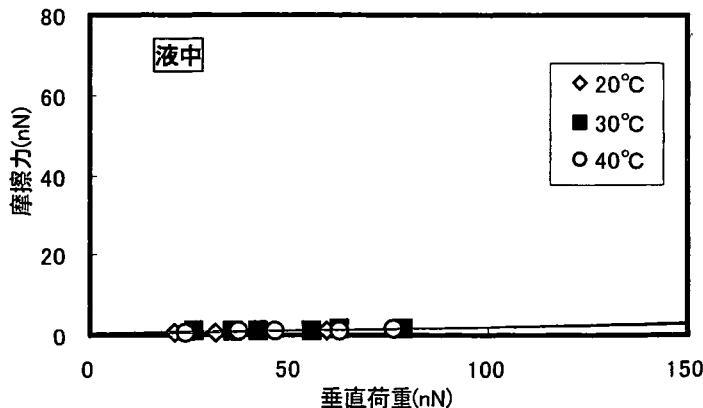


図 14 勝光山パイロフィライトの垂直荷重-摩擦力関係図

表 2 異なる温度での粘土の摩擦係数 μ (液中)

試料名	20°C	30°C	40°C
クニピア F	0.008	0.009	0.011
勝光山パイロフィライト	0.015	0.016	0.017

表 3 粘土とシリコンウエハとの位相差 (湿度 90%)

試料名	20°C	30°C	40°C
クニピア F	102.5°	99.3°	95.2°
クニボンド	95.2°	89.1°	83.8°
カオリン KH	110.4°	92.3°	83.0°
勝光山パイロフィライト	129.8°	105.3°	73.9°

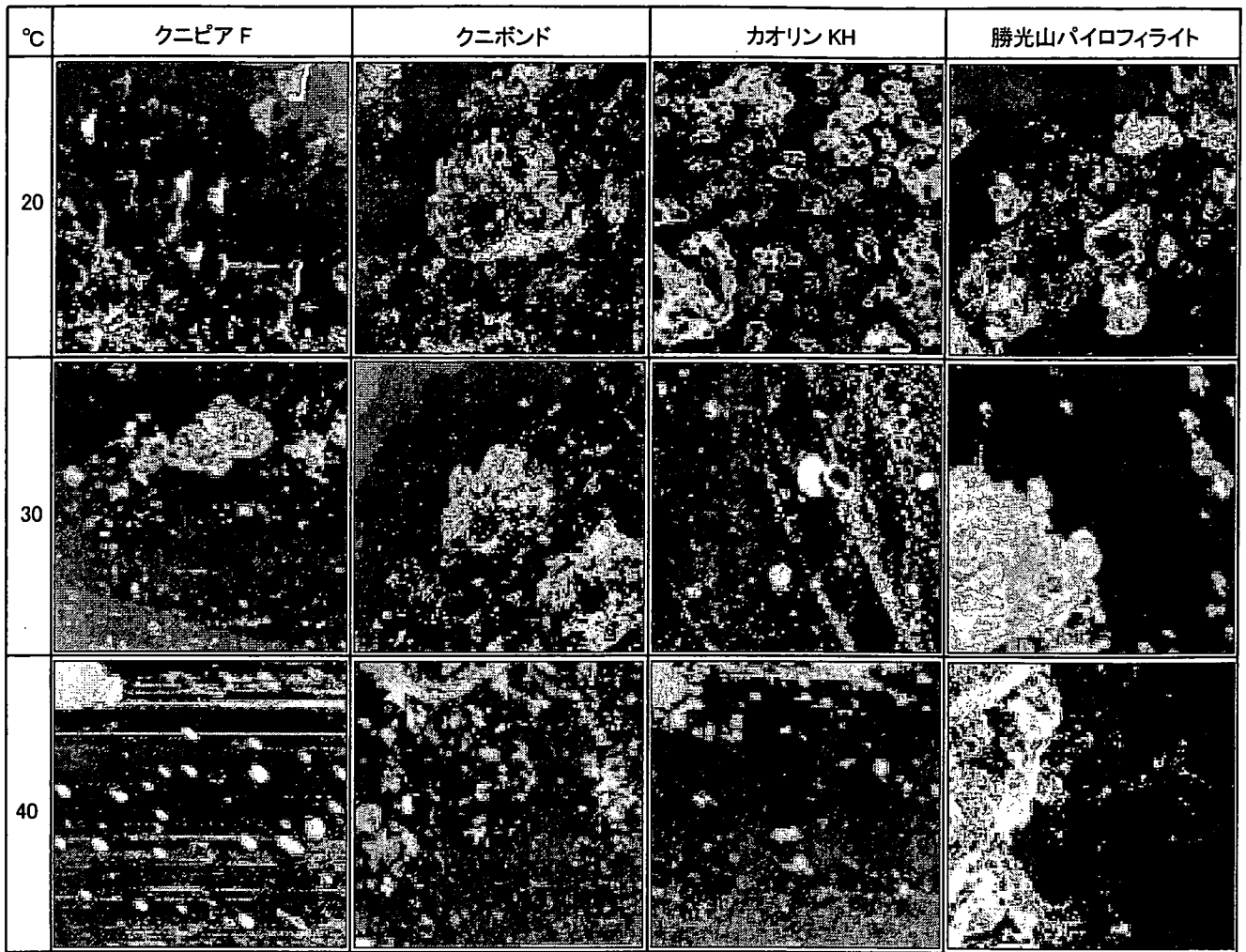


図 15 異なる温度条件下での粘土の位相像(湿度 90%)

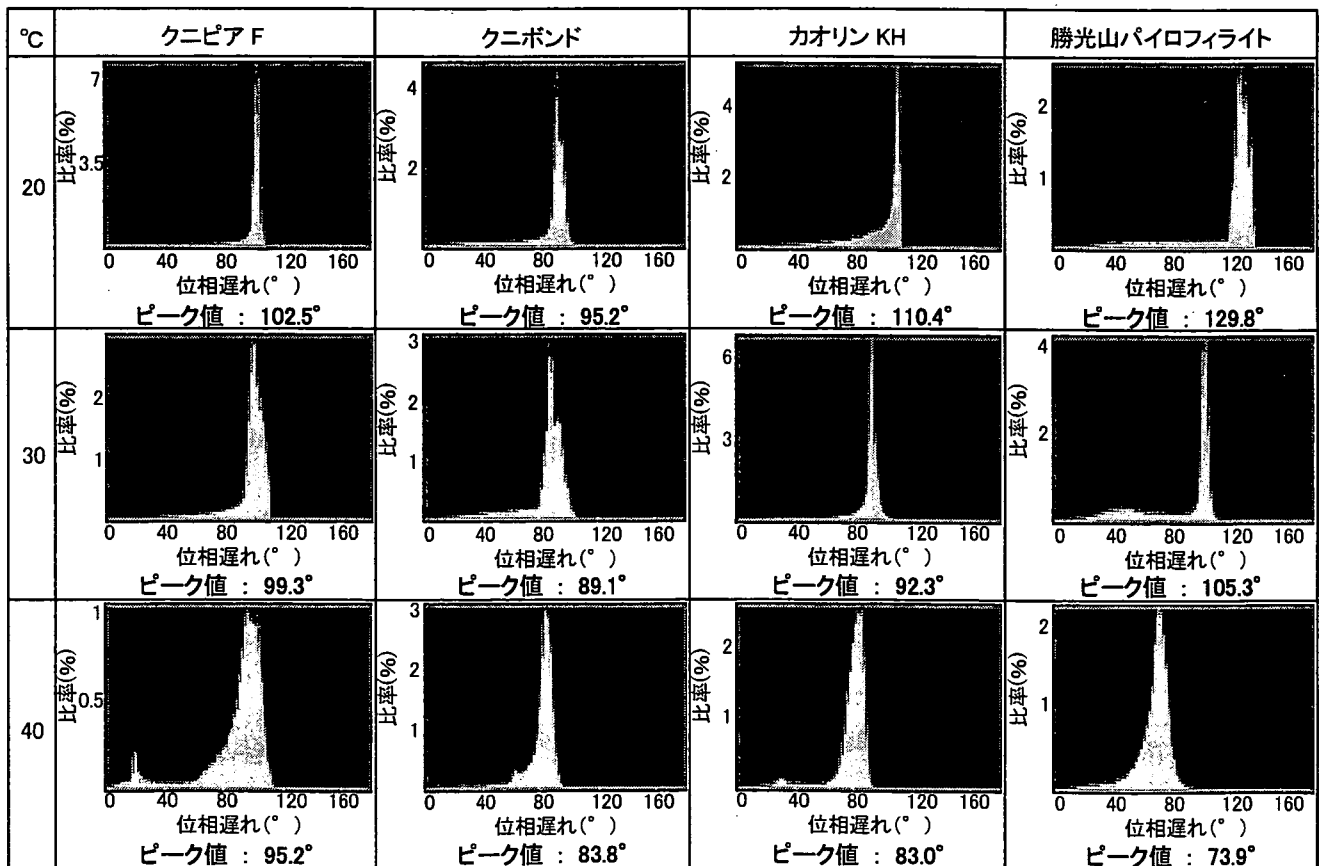


図 16 位相遅れのヒストグラムとピーク値

5. まとめ

原子間力顕微鏡による粘土の摩擦力・粘性測定結果を以下に示す。

- ① 湿度 90%ならびに液中での測定より得られた摩擦係数 μ は、膨潤性粘土鉱物（クニピア F, クニボンド）、非膨潤性粘土鉱物（カオリン KH, 勝光山パイロフィライト）に関わらず乾燥状態の摩擦係数 μ より小さい。
- ② ①の摩擦係数 μ は、温度上昇（20℃→30℃→40℃）に伴い大きくなる。
- ③ 湿度 90%状態での測定より得られた粘性は、温度上昇（20℃→30℃→40℃）に伴い小さくなる。

6. おわりに

まとめ②, ③より、温度上昇に伴い摩擦係数は大きくなるが粘性は小さくなるといった逆の結果が得られた。粘性は、運動している流体のずれ摩擦の程度を表していることから、本来であれば粘性と摩擦係数とは同じ傾向を示すはずである。これは摩擦係数と粘性の測定が、異なる部分を測定している可能性があるなど、さらなる検討が必要である。

<参考文献>

- 1) 大河原正文・三田地利之・米田哲朗：第 46 回粘土科学討論講演要旨集,pp.150-151,2002.
- 2) 森田清三 編著：原子・分子のナノ力学,丸善,2003.
- 3) 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.
- 4) 久常雄大・大河原正文・三田地利之：地盤工学会北海道支部技術報告集,第 46 号,pp.99-106,2006.
- 5) 大河原正文・三田地利之・太田正裕：第 38 回地盤工学研究発表会講演集,pp.223-224,2003.

残留状態せん断面のその場観察/分析用「小型せん断ユニット」の開発

岩手大学 国際会員 大河原正文
岩手大学大学院 ○学生会員 九千房修司
北海道大学大学院 国際会員 三田地利之

1. はじめに

筆者らは、粘土の残留強度発現機構の解明を目的に、残留状態におけるせん断面(以後、残留状態せん断面)の微視的構造、粒子の運動特性、吸着水の物性などについて研究してきた^{1)~3)}。一連の研究では、観察/分析のための供試体として一面せん断試験により形成された残留状態せん断面を使用していた。しかし、試験終了後にせん断箱から供試体を取り出し分析に用いているため、供試体を取り出す際の試料乱れや分析中の乾燥などが懸念される。そもそも、せん断中(運動中)の現象を停止状態で分析していること自体、厳密には強度発現時の状態とは異なる。

そこで本研究では、せん断中のせん断面を直接、観察/分析可能な「小型せん断ユニット」を開発した。小型せん断ユニットは軽量かつコンパクトで、赤外分光分析装置、共焦点レーザー顕微鏡など各種分析機器への取り付けが可能である。

2. 試験装置

小型せん断ユニットは、分析対象から「断面」用と「表面」用からなる。

2.1 「断面」観察/分析用小型せん断ユニット

「断面」用ユニットを写真1(せん断部)に、ユニット構成を図1に示す。本ユニットは、せん断部、操作盤、データ計測部から構成され、操作盤にはコンプレッサーが接続されている。せん断部の寸法は横幅 191mm、奥行 29mm、高さは 106mm、重量は約 2kgfと軽量かつコンパクトで簡単に持ち運びができる。最大の特徴は、せん断部が各種分析機器に取り付けられることで、せん断中のせん断面を断面方向からその場観察/分析できることである。

せん断部(本体)

せん断部は、せん断箱、小型エアシリンダー、載荷板、小型荷重計、モーター駆動軸から構成される。せん断箱は、上箱固定、下箱可動でサイズは縦 1.5cm×横 2.5cm×高さ 2cmと通常の一面せん断試験機に比べると小さい。せん断箱の前面はアクリル製でせん断時のせん断面の状態を観察できる。せん断箱隙間は 0.2mmである。垂直荷重は、下せん断箱の下部に取り付けられた小型荷重計により測定される。垂直変位および水平変位は、せん断箱、載荷板の変位が測定できるようにそれぞれの支持器具に取り付けられている。

なお、本ユニットにはせん断力を測定するための荷重計がないため、残留強度を測定することはできない。

操作盤

操作盤は、せん断箱(せん断力)と載荷板(垂直力)を操作するためのもので、モーター回転方向切り替えスイッチ、モーター速度調整ダイヤル、モーター速度表示器、繰返し回数カウンタ、圧力計、エアシリンダーの加圧・減圧選択レバー、精密減圧弁、エアフィルター、コンプレッサー接続部から構成される。

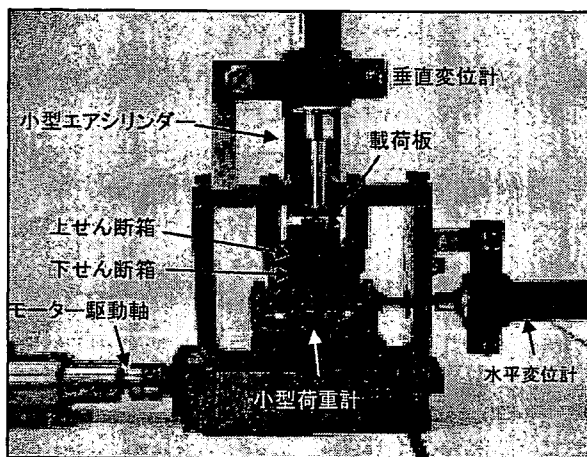


写真1 「断面」観察/分析用小型せん断ユニット

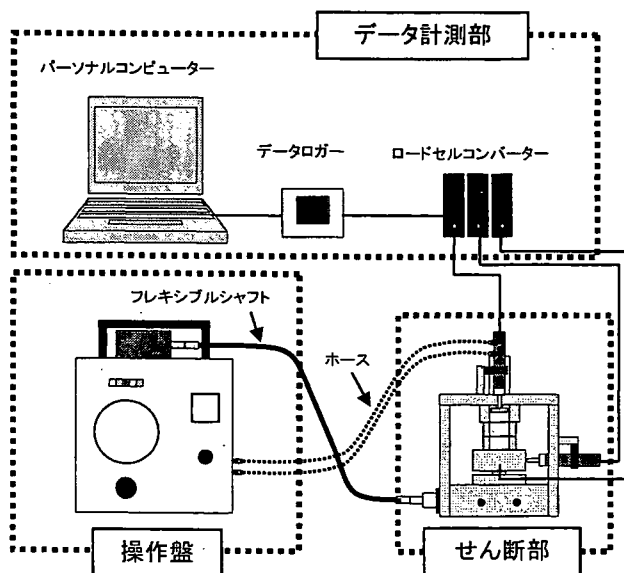


図1 「断面」観察/分析用小型せん断ユニット構成図

Development of an in-situ observation/analysis compact shear unit of shear surface at residual state

Masafumi OKAWARA (Iwate University), Syuji KUSENBOH (Graduate Student, Iwate University), Toshiyuki MITACHI (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

なお、操作盤はフレキシブルシャフトによりせん断部と連結され、モーターの回転力がこのシャフトを介してせん断箱に伝達される。

データ計測部

計測部は、ロードセルコンバーター、データロガー、パーソナルコンピューターから構成される。現システムでは、ロードセルコンバーターによって増幅されたアナログ信号をデータロガーによってデジタル信号に変換するとともに、垂直応力、垂直変位、水平変位に換算してパーソナルコンピューターで表示している。

2.2 「表面」観察/分析用小型せん断ユニット

表面用ユニットを写真2(せん断部)に、ユニット構成を図2に示す。本ユニットは、せん断部、操作盤、データ計測部から構成され、操作盤とデータ計測部は「断面」用せん断ユニットと共通である。せん断部の寸法は横幅 190.8mm、奥行 170mm、高さは 98.3mm、本体重量は約 3kgf と軽量かつコンパクトである。最大の特徴は、せん断箱が強化ガラス上を移動するために、せん断中のせん断面の「表面」を下からその場観察/分析できることである(写真3)。ここでの表面とは供試体下面と強化ガラスとの接触面(≒せん断面)ということである。

せん断部(本体)

せん断部は、せん断箱、小型エアシリンダー、載荷板、小型荷重計、小型スクリージャッキ、モーター駆動軸から構成される。せん断箱は、上せん断箱のみで、サイズは縦 1.5cm × 横 2.5cm × 高さ 1cm である。また、せん断面を下から観察できるように基盤に直径 1.5cm の穴が開いている(写真3)。垂直荷重は、載荷板直上の小型荷重計により測定される。せん断力は、水平ロッドに取り付けられた小型荷重計により測定される。垂直変位および水平変位は、それぞれ変位計により測定される。

3. 供試体および試験方法

3.1 供試体作製方法

供試体の作製は、通常の練り返し試料の作製方法と同じである。すなわち、(1)粉末試料に蒸留水を加えミキサーで攪拌する、(2)練り返した試料を圧密セルに移し変えて真空ポンプで脱気する、(3)所定の圧密圧力で一定期間圧密する、である。予圧密が終了したら図3のような供試体成形盤を用いてワイヤーソーでカットする。粘土のような軟らかい試料を扱う場合は、供試体挿入にあたり端面損傷に十分に注意が必要である。なお、小型せん断ユニットは、粘土のみならず砂質土などあらゆる土質に対応するため練り返し試料のみならず不攪乱試料の試験も実施できる。

3.2 試験手順

圧密からせん断までの試験手順は、「断面」用、「表面」用ともにほぼ同じである。以下に手順を示す(写真4)。

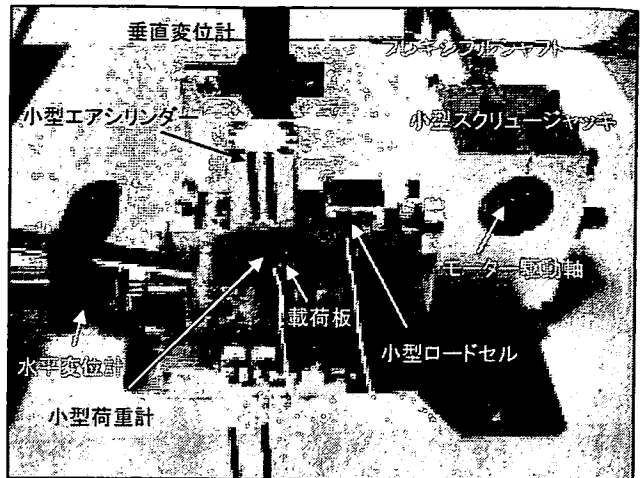


写真2 「表面」観察/分析用小型せん断ユニット

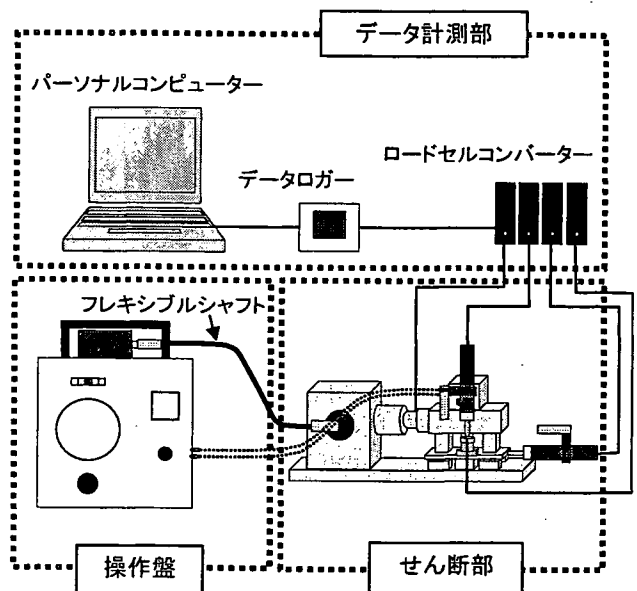


図2 「表面」観察/分析用小型せん断ユニット構成図

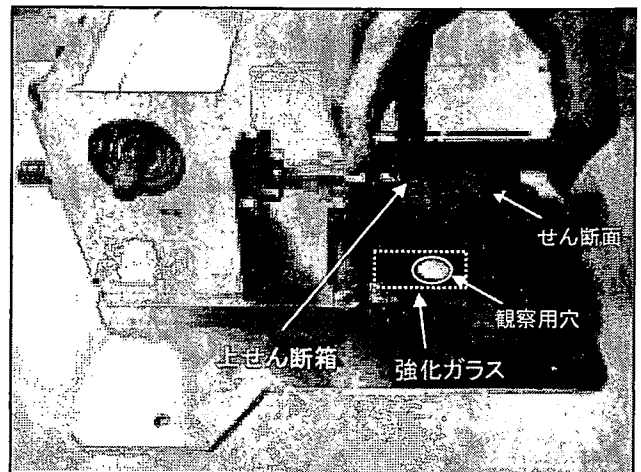


写真3 表面観察/分析部分の構成

- ① 供試体をせん断箱に挿入する。
- ② せん断箱の前面にアクリル板を取り付ける。ステージに強化ガラスを置く(「表面」観察/分析用)。
- ③ 上部のはみ出した試料をワイヤーソーでカットする。
- ④ せん断駆動部にせん断箱を取り付ける。
- ⑤ 垂直力測定用、せん断力測定用(「表面」用)の小型荷重計を取り付ける。
- ⑥ 垂直変位計、水平変位計を取り付ける。
- ⑦ 圧密開始。
- ⑧ 3t法により圧密を打ち切る。
- ⑨ せん断を開始する(試験条件:表1)。
- ⑩ 残留状態に至った時点で、観察、分析を行う。
- ⑪ 試験終了

なお、各種分析機器への取り付けのタイミングは、対象機器により異なる。

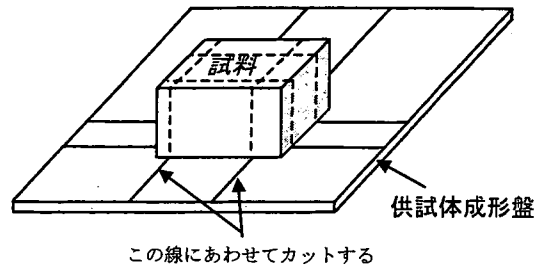


図3 供試体の成形方法

表1 せん断試験の試験条件

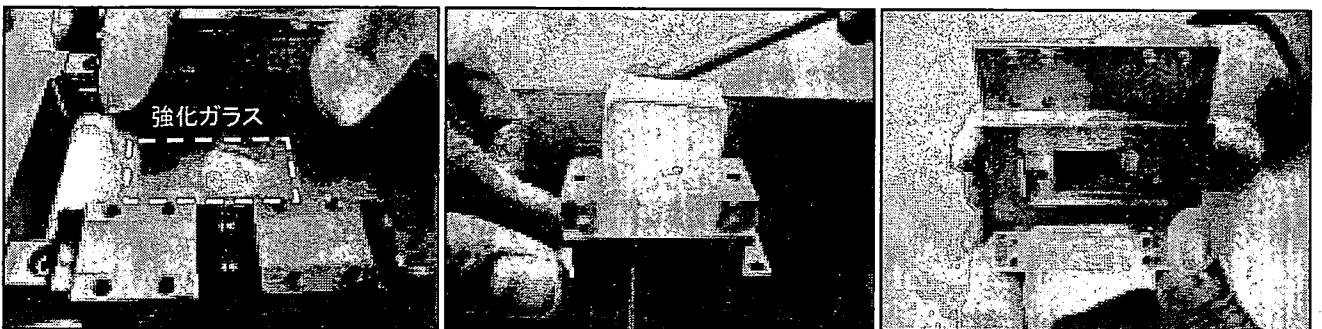
試験条件	圧密定圧条件
せん断速度	0.1 mm/min
せん断変位置	6 mm



① 試料をトリミングする

② 供試体をせん断箱に挿入する

③せん断箱前面にアクリル板を取り付ける



④ ステージに強化ガラスを置く

⑤ はみ出した試料をカットする

⑥ せん断箱を駆動部に取り付ける

写真4 試験手順

4. 繰り返し一面せん断試験

「表面」用小型せん断ユニットを用いて試行的に繰り返し一面せん断試験を行った。供試体には繰り返し NSF 粘土を用いた。試験は圧密定圧条件とし、せん断速度:0.1mm/min、せん断変位置(一方向):6mm、繰り返し回数:6回、累積変位置:36mm(6mm×6回)である。図4に圧密結果を示す。図より一次圧密から二次圧密に至る過程が確認できる。3t 到達時間は480000秒(133時間20分)で、我々が普段実施している一面せん断試験に比べると長い。試験終了後、せん断箱から供試体を取り出したところ供試体が乾燥していた。乾燥対策が今後の課題である。なお、圧密曲線の経過時間1000秒付近にみられる0.06mm程度の沈下は、供試体とせん断箱との間に生じた隙間を供試体が埋めたことによるとみられる。

図5にせん断応力-水平変位関係を示す。せん断開始直後

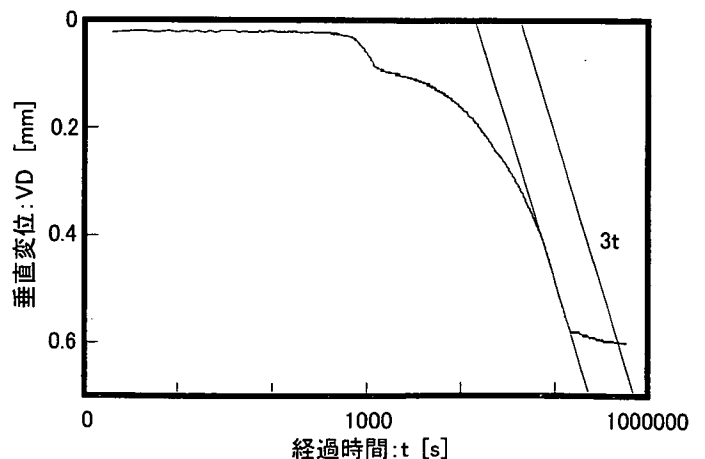


図4 圧密曲線

には 20kPa ほどあったせん断応力が繰り返しせん断により 12kPa～14kPa に収束していることがわかる。「表面」用せん断ユニットにより残留状態にできることが確認された。

5. 今後の予定(分析機器への取り付け)

写真5, 写真6に小型せん断ユニットを顕微 FTIR(フーリエ変換型顕微赤外分光分析装置), CLSM(共焦点レーザー顕微鏡)に取り付けた様子を示す。今後の予定として, 「断面」用ユニットを用いてせん断面に吸着している水の分光学的特性を, 「表面」用ユニットを用いてせん断面とガラスとの接触状態を明らかにする予定である。

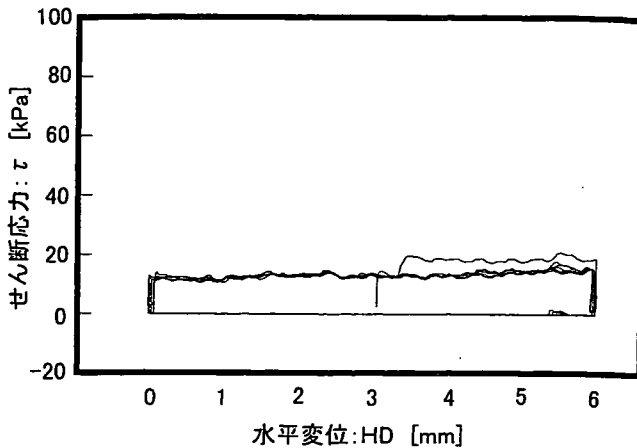


図5 せん断応力[τ]-水平変位[HD]の関係

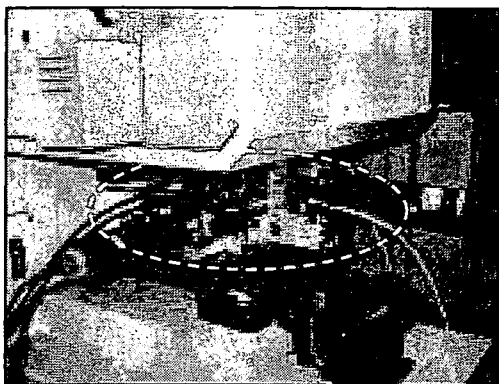


写真5 FTIR に取り付け「表面」観察/分析用小型せん断ユニット

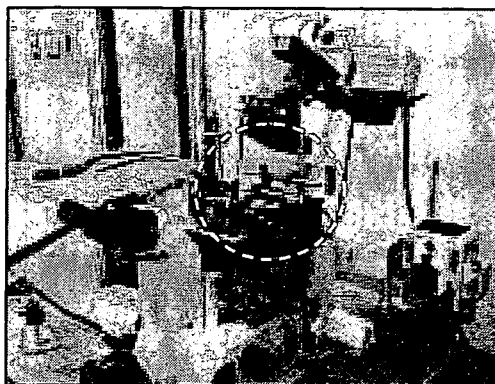


写真6 共焦点レーザー顕微鏡に取り付けた「表面」観察/分析用小型せん断ユニット

参考文献

- 1) 大河原正文・三田地利之:粘土の残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi' r$ と真実接触面積との関係, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第46号, pp.107-114, 2006
- 2) 大久保幸倫・大河原正文・三田地利之:粘土鉱物中の水分析 -FTIR および NMR 測定-, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第46号, pp.115-118, 2006
- 3) 久常雄大・大河原正文・三田地利之:原子間力顕微鏡による粘土のマイクロ摩擦力測定, 第50回粘土科学討論会講演要旨集, pp.198-199, 2006

遠心模型実験装置を用いた二層地盤における降雨再現実験

北海道大学大学院○学生会員 金子広明
北海道大学大学院 国際会員 田中洋行
北海道大学大学院 国際会員 工藤 豊
北海道大学工学部 非会員 伊勢大亮

1.はじめに

豪雨における斜面災害は過去より繰り返して起きている。特に近年は異常気象の影響により、集中的な豪雨が各地で発生している。また、降雨時の斜面崩壊の原因としては、雨水の浸透により表面付近の土の飽和度が大きくなり、単位体積重量が増え、見かけの粘着力が小さくなることが考えられる。したがって、豪雨時の斜面の安定を解明するためには、地下水面より上の不飽和地盤の間隙水の移動を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、粘土含有率の異なる二種類の試料を用いて、二層から成る模型地盤を作製し、降雨実験を行った。この実験から、二層の境界面に地下水が溜まる様子を観測し、それに伴う崩壊の機構を調べた。

本研究では、コストと時間のかかる大規模な実大実験の代わりに、遠心模型実験装置を用いた縮小模型において豪雨時の不飽和地盤の挙動を調べた¹⁾。

2.実験概要

本研究は昨年度からの継続実験であり、昨年度の研究報告は笠間、他²⁾によって報告済みである。昨年度は豊浦標準砂 ($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$) と笠岡粘土 ($\rho_s=2.61\text{g/cm}^3$) を質量比 95 : 5 の割合で混合した試料を使って飽和度 50% の不飽和地盤を作製し、降雨再現実験を行った。今年度は、透水係数の影響を調べるために豊浦標準砂と笠岡粘土を質量比 100 : 0 (以下、粘土分 0%)、質量比 95 : 5 (以下、粘土分 5%)、質量比 90 : 10 (以下、粘土分 10%) の割合で混合したの 3 種類の試料を用いて、二層地盤を作製し、平面および斜面地盤に対して降雨実験を行った。

2.1 模型地盤

模型地盤の作製方法は以下の通りである。砂と粘土と水を所定の配合で十分に攪拌した後、模型土槽(W45×D20×H40cm)に投入する。試料は 8 層 (1 層辺り深さ 2.5cm) に分けて、飽和度が 50% となるように締め固めて平面地盤を作製する。その際に、間隙水圧計を所定の深さに設置する。その後、平面地盤を斜面角度 45° となるように削り出し、斜面地盤を作製した。また、上から深さ 5cm までを上層、深さ 5cm から底 (深さ 20cm) までを下層とし、上層と下層では異なる試料を用いた。平面および斜面地盤の寸法と間隙水圧計の設置位置を図-1、2 に示す。

模型土槽を遠心模型実験装置に設置後、間隙水圧計の値が安定するまで、すなわち、地盤内の水分移動が十分に行われるまで所定の遠心加速度を載荷し、その後降雨を模した散水を行った。平面地盤は降雨時の排水を行わなかったが、斜面地盤は法先部に地盤底部から 5cm の位置に排水口を設け、降雨時に斜面表面を流れて法先部へ溜まった水と、地盤へ浸透した後法先部へ浸出した水を土槽外部へと排水した。

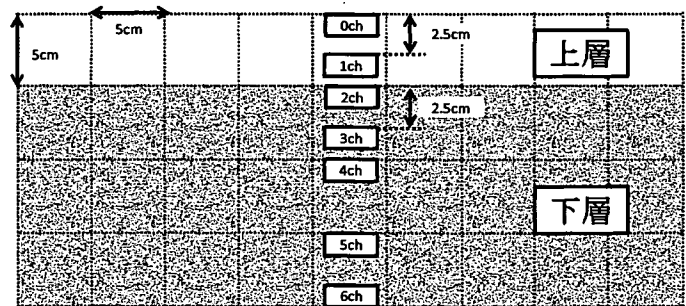


図-1 二層平面地盤

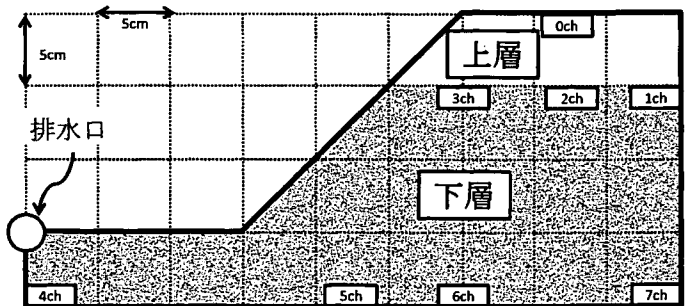


図-2 二層斜面地盤

2.2 実験装置

・遠心模型実験装置 (図-3 参照)

遠心模型実験装置は、地盤の挙動や構造物を対象とした縮尺模型実験として力学的な相似則が明確で、実地盤での挙動を忠実に再現する高精度な模型実験手法である。遠心模型実験装置により重力加速度の n 倍の遠心加速度を载荷させることで、対象構造物の $1/n$ 倍の地盤内応力は実地盤と同じにすることが出来る。本研究で用いた遠心模型実験装置は、最大加速度 150G、最大積載量 100kg、有効回転半径 1.5m である。模型土槽前面には CCD カメラを 2 台設置しており、カメラの映像はスリプリングを介して、また間隙水圧計などの計測機器類のデータはワイヤレスデータロガーを用いて無線で、それぞれ制御室に伝送される。

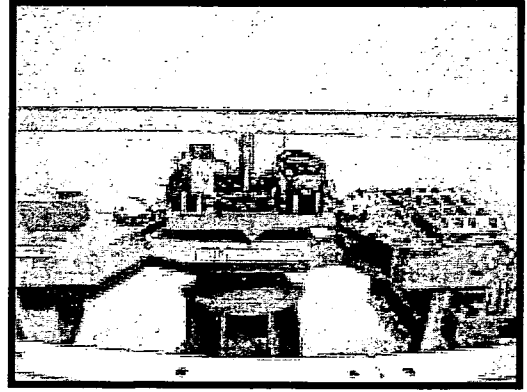


図-3 北大遠心模型実験装置

・間隙水圧計

本研究で用いた間隙水圧計は、SSK 社製のものである。この間隙水圧計の特徴としては直径が約 8mm と非常に小型であり、縮小模型地盤に設置可能であることが挙げられる。また、受圧面がステンレスとセラミックの二つのタイプのものを使用した。

・散水装置 (図-4 参照)

散水装置によって、水を霧状に散布できる 3 つの散水バルブによって降雨を再現した。本研究では、散水装置から散水速度 1.8L/min、0.9L/min で模型地盤に散水した。以下の結果においては、降雨強度 (単位面積当たりの散水速度) を遠心加速度 (本研究においては遠心加速度は 40G) で除して、実地盤換算した降雨強度の値 (1.8L/min=30mm/hr/G、0.9L/min=15mm/hr/G) で表現する。

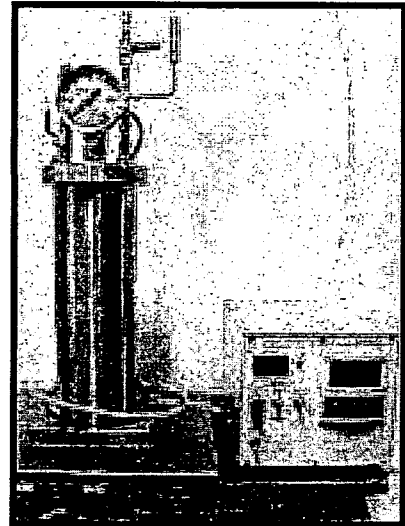


図-4 散水装置

3. 二層平面地盤

3.1 間隙水圧の時間的变化

表-1 に二層平面の降雨実験における実験条件を示す。また、図-5 には降雨開始後からの設置された間隙水圧計 (図-1 参照) で計測された間隙水圧の時間変化を示す。

表-1 二層平面地盤降雨実験条件

試験No.	遠心加速度 (G)	上層	下層	降雨強度 (mm/hr/G)	降雨量 (L)	降雨時間 (sec)
①	40	粘土分0%	粘土分5%	30	2.4	80
②	40	粘土分5%	粘土分10%	30	2.4	80
③	40	粘土分0%	粘土分10%	30	2.4	80

● : 地表面 ○ : 深さ 2.5cm ▲ : 深さ 5cm △ : 深さ 7.5cm ■ : 深さ 10cm □ : 深さ 15cm ◆ : 深さ 20cm

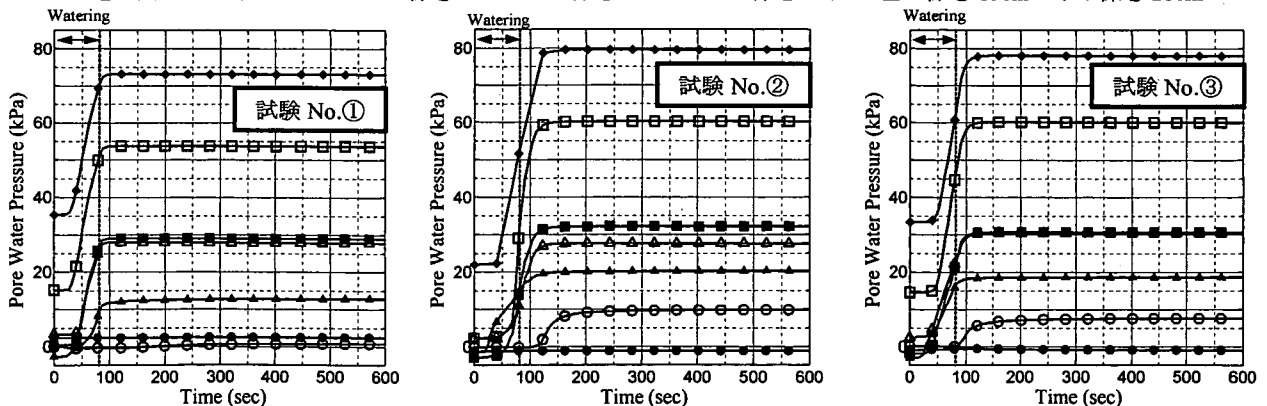


図-5 二層平面降雨実験の間隙水圧変化