

Figure 1 shows a schematic view of the experimental model and the arrangement of the linear variable displacement transducers (LVDTs). The digital video camera and CCD camera (1600×1200 pixels) were installed in the front of the Plexiglas sidewall to provide a continuous record during the centrifuge test. Another video camera was also mounted at the top of the slope to observe the movement of slope failure.

### 3. Experimental results

After the model box was loaded onto the centrifuge platform, the slope model was gradually accelerated until the slope failure can be observed. During the increasing in the acceleration level, the vertical ground deformation can be observed especially in the area below the embankment. Upon reaching an acceleration level of about 25-30g, the failure mechanism was initiated by horizontal movements of the slope face. The complete slope failure was observed at the acceleration of about 54g, where the slope and embankment heights were equal to 4.3 m and 4 m, respectively corresponding to the prototype scale. Photographs 1(a) and (b) show the slope model at 1g and after the slope failure, respectively. The two-dimensional displacement of ground model was evaluated by measuring the displacement of each target captured by taking photographs through the Plexiglas sidewall during the centrifuge flight. The coordinate of each target was determined by a digitizer

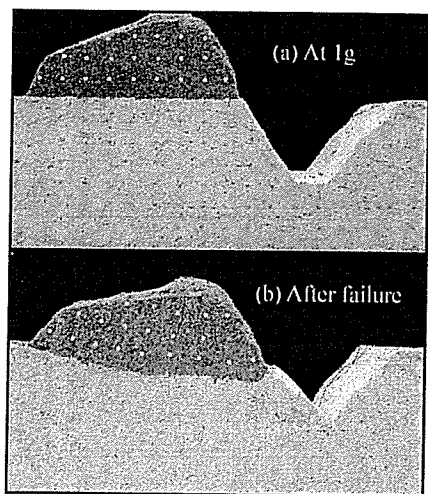


Photo. 1. Slope model at 1 g (a), after slope failure (b)

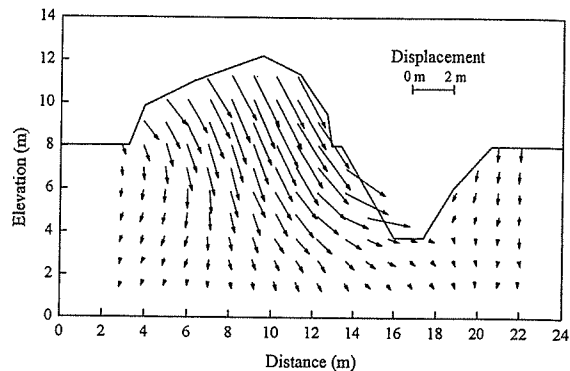


Fig. 2. Displacement vectors after slope failure

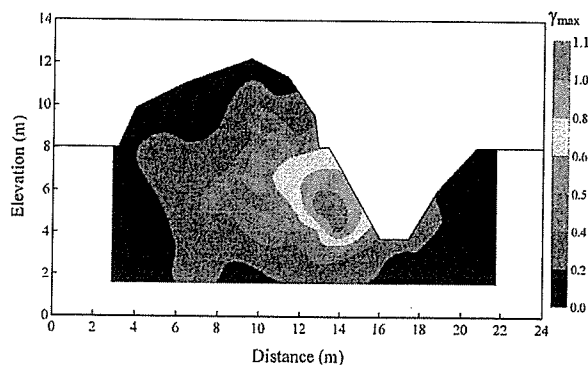


Fig. 3. Distribution of the maximum shear strain software. Each rectangular grid was divided into two triangles, and the Lagrangian strains on these two triangles were averaged and then used to compute the engineering strain. Figure 2 shows the displacement vectors of ground model after slope failure, maximum displacement of about 2.75 m corresponding to the prototype scale can be observed. Figure 3 shows the distribution of a maximum shear strain ( $\epsilon_1 - \epsilon_3$ ), large maximum shear strain can be observed from the toe of slope toward the embankment. In addition, it should be noted that the failure plane cannot be clearly observed in the slope model. This is probably due to the fact that the ground model suffered from the large vertical deformation due to the self-weight of the embankment. The failure tends to be deep which makes it difficult to detect the failure plane.

### 4. Conclusions

Based on the centrifuge modelling test results, it was found that the excessive surcharge load from the excavated material stockpiled on the top of slope induced the large deformations which resulted in slope failure in peat ground.

# 遠心力載荷実験による降雨時の斜面安定の検討

田中洋行<sup>1</sup>, 阿部篤史<sup>2</sup>, 笠間太樹<sup>1</sup>, 三田地利之<sup>1</sup>

1 北海道大学大学院・工学研究科

2 NTT 東日本 (前北海道大学大学院・工学研究科)

## 概要

不飽和地盤を対象として、降雨時の地下水位の変化を調べるために、遠心力載荷実験を行った。用いた試料は豊浦砂で、間隙比が 0.8 の状態で飽和度が 50% になるように締固めて模型地盤を作成した。行った実験は平面地盤と斜面地盤の 2 種類である。平面地盤に 10G から 50G の遠心加速度を作用させ、不飽和地盤が遠心場で再現できることを確認した。すなわち、模型地盤のほぼ中央に地下水面が現れ、それより下は深さと共に間隙水圧が増加する地盤と、それより上の不飽和地盤が確認できた。しかしながら、不飽和地盤中の負の間隙水圧、サクションについては、再現ができたか否かの確証は得られなかった。斜面地盤に対して、様々な降雨強度の下で地盤内の地下水の変動を観測した。この結果、降雨強度が大きいほど、加速度が小さいほど、地下水位が高くなることがわかった。

キーワード：不飽和地盤，地下水位，降雨，遠心力載荷実験

## 1. はじめに

豪雨による地盤災害が毎年発生しており、多くの人命や財産が失われている。降雨による地盤崩壊は、不飽和地盤が降雨によってサクションの喪失などの内部応力の変化や、浸透流などによる外力の作用によって生じると考えられる。しかしながら、今までの土質力学はその主な対象を飽和地盤としているために、不飽和地盤のメカニズムは未だ不明な点が多い<sup>1)</sup>。

地盤工学において、崩壊などの現象を解明する手段として模型実験が広く用いられている(例えば参考文献 2), 3)。実大規模の実験では多額の費用と長期の時間を必要とするので、縮尺模型による実験が望ましい。しかしながら、小さな縮尺模型では、地盤中に作用する応力が実物と異なるため、得られた結果の解釈が難しい。縮尺モデルに遠心力加速度を載荷すると、地盤に作用する応力が実物と等しくなるため、遠心力載荷実験は非常に有効である。しかしながら、不飽和地盤に対する実験例は少なく、相似則を含めた実験手法は未だ手探りの状態と言って良い<sup>4)</sup>。

今回、不飽和地盤の降雨時の安定を検討するための第一段階として、豊浦砂による基礎的な実験を行った。試験は、条件を簡単にした平面地盤と、その結果を応用した斜面地盤について行った。本報告では、これらの試験から得られた結果を述べ、試験結果の妥当性と、遠心力載荷実験に関する相似則について議論する。

## 2. 実験方法

### 2.1 模型地盤の作成方法

あらかじめ含水比 15% に調整された豊浦砂を、締固め板によって 5 層に分けて締固めて模型地盤を作成した。模型土槽の大きさは、高さ 40cm, 幅 45cm, 奥行き 20cm である。投入された試料の重量、および体積から表-1 に示す地盤ができあがった。なお、試験ごとに地盤のばらつきが観測されたが、間隙比の範囲は 0.75 から 0.85 の間にあった。平面地盤は高さが 20cm となるように地表面を整形した。斜面地盤は図-1 に示すように、斜面角度 45°, 斜面高さ 15cm (一部の試験は 7.5cm) となるように整形した。降雨時の下流側の水面の位置を一定とするために、図-1 の斜面底部地盤(図の左側)には排水孔を設け、降雨によって生じた水を排水した。また、地盤内の間隙水圧を測定するために、模型地盤作成時に間隙水圧計(SSK 社製、直径 7mm)を所定の深さに埋設した。

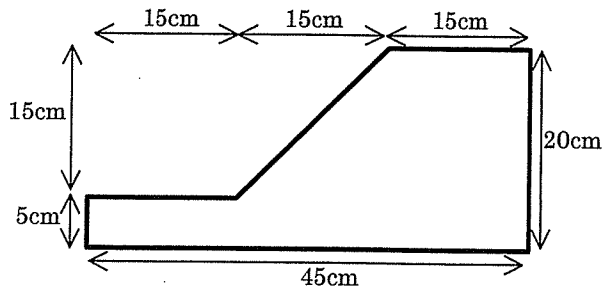


図-1 斜面地盤

表-1 模型地盤の地盤定数

土粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.65
湿潤密度 $\rho_t$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.68
乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.46
間隙比 $e$	0.8
飽和度 $S_r$ (%)	50
平均含水比 $w$ (%)	15

## 2.2 散水

降雨は、模型地盤の上部に取り付けられている3個のノズルによって行われた。制御室に設けられた給水装置によって、定められた量の水が遠心载荷装置に供給される。降雨強度( $r$ )は、時間当たりの給水量を模型地盤の面積で除して求めた。

## 2.3 遠心力载荷装置

本実験で用いた遠心力载荷装置は、最大搭載質量150kg、有効回転半径1.5m、最大遠心加速度は150Gである。間隙水圧などのデータはワイヤレスデータロガーによる無線によって制御室に送られる。また、模型装置にCCDカメラを設置し、撮影された画像はスリッピングを介して送られる。

## 3. 平面地盤の実験結果

以下に述べる試験結果は、4.2 相似則で述べる以外は、模型上で測定された値で表示する（実物換算はしていない）。

### 3.1 Gの上昇による地盤内の間隙水圧の分布

飽和度が50%の地盤に遠心加速度を加えることによって、目標とする不飽和地盤が作成できるかを確認するため、同一地盤で種々のGの下で地盤内の間隙水圧を測定した。所定のGに到達し、測定された間隙水圧が一定となった値を図-2に示している。

飽和度が50%なので、地盤上部の水分が完全に下方に移動すると考えると、地下水面は10cmの位置となる。しかしながら、図に示すように地下水面は地表面から約8cmの位置にある。この地下水面の位置より下の地盤の間隙水圧は、深さと共に増加している。また、Gが増加するにつれて、その勾配も増加している。この勾配から、間隙流体の質量を計算した。結果を図-3に示す。実験は同様な条件で3回行った。図-3および4に示すExperiment1から3とあるのは実験の番号である。間隙が完全に水で満たされると、間隙流体の単位体積質量 ( $\rho_w$ ) は  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  となる。しかし、図に示すように、実験によって多少のばらつきはあるが、 $\rho_w$  はGとともに増加する傾向にある。また、遠心力加速度が50Gとなった状態でも、 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  より小さい。すなわち、地下水位より下は水で完全に飽和しているわけではなく、間隙流体の中に空気が混在しているため、単位体積質量が  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  より小さくなったと考えられる。

今回の実験では水分計を設置していないので、実験中の

含水比あるいは飽和度は計測できなかった。その代わりに、実験終了後の模型地盤の含水比を測定した。図-4に含水比

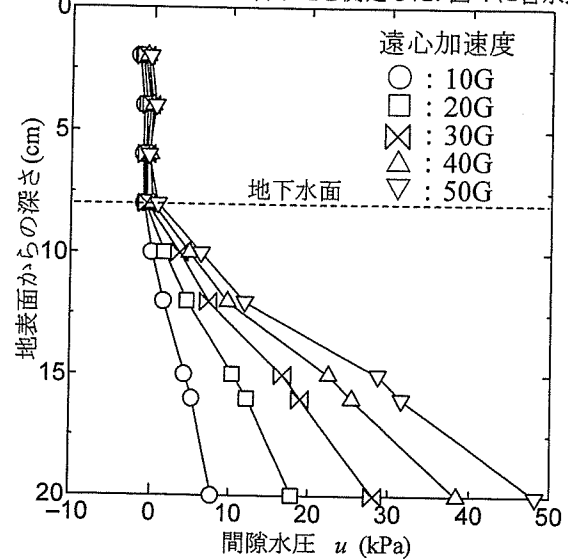


図-2 地盤内の間隙水圧の分布

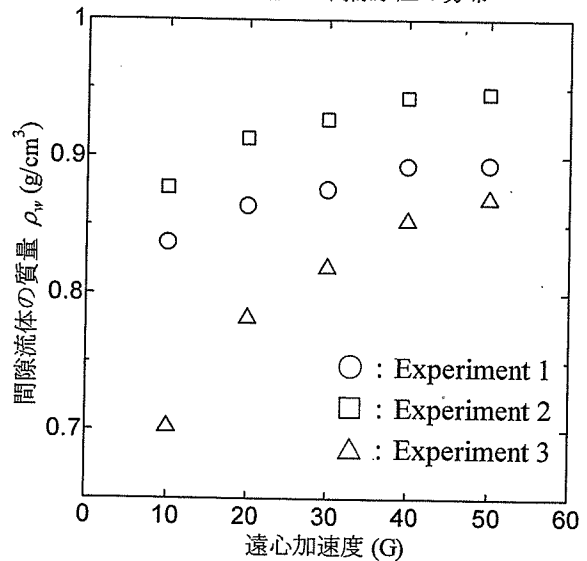


図-3 間隙流体の単位体積質量

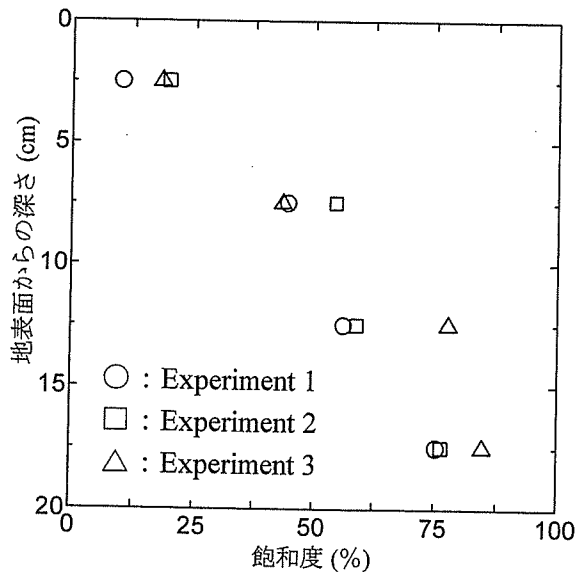


図-4 実験後の飽和度の変化

から求めた模型地盤内の飽和度( $S_r$ )の分布を示す。遠心力  
 載荷装置を停止し、含水比を測定するための試料を採取す  
 る間に水分の移動があると考えられるが、図に示す結果は、  
 水分の移動は生じていないと仮定している。図から、地下  
 水面付近の飽和度は50%で、深さと共に飽和度が増加する  
 が、17.5cmの深さにおいても完全には飽和していない。  
 これは、図-3に示した間隙流体の $\rho_w$ が $1.0\text{g/cm}^3$ より小さ  
 かった事実と符合している。

今回の実験の大きな目的の一つは、地表面付近に位置す  
 る不飽和地盤のサクシオンを再現することであった。豊浦  
 砂の水分保持曲線は多くの研究者によって測定されてい  
 る。この曲線は、間隙比や土粒子の配列によって影響され  
 ると考えられるが、阿倍<sup>9)</sup>のデータを参考にすると、図-4  
 に示す飽和度が10%前後である地表面から2.5cmの深さで  
 は、数kPaのサクシオンが働くことになる。この値を念頭  
 に図-2に示す地下水位より上部の間隙水圧分布を見てみ  
 る。すでに述べたように間隙水圧の計測はSSK社の小型  
 間隙水圧計を用いた。負の間隙水圧も計測できるよう受圧  
 面は空気侵入値が200kPaのセラミックで覆った構造とな  
 っている。図-2に示すように地下水面より上の間隙水圧は  
 0あるいは負の間隙水圧を示している。しかし、地下水位  
 より下の間隙水圧と異なり、Gの増加によって負の間隙水  
 圧(サクシオン)が増加する傾向は認められない。

不飽和地盤の間隙水圧を別な方法で計測した。図-5に示  
 す高さ10cmの地盤をすでに述べた同じ方法で作成し、底  
 部には排水孔を設け、加速度の増加によって移動した水分  
 は土槽から排水させた。また底部から5cmの位置にサク  
 シオン計測器を設置した。このサクシオン計測器は、当研  
 究室が飽和粘土のサクシオン測定に使用している方法<sup>6)</sup>と  
 同じものを使用した(セラミックの空気侵入値は240kPa)。

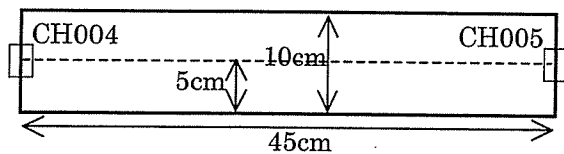


図-5 負の間隙水圧を測定するための地盤

図-6に遠心力加速度を増加した時の計測されたサクシ  
 ョンの変化を示す。図に示すように重力加速度(1G)の  
 下でも2kPa程度のサクシオンが計測されている。Gの増  
 加とともにサクシオンは多少減少する傾向にあるが20G  
 を超えたあたりから、Gの増加と共にサクシオンは増大し  
 ている。しかしながら、加速度を30Gに増加させると急  
 にサクシオンは減少し40Gになると正の間隙水圧が生じ  
 ている。このように、地下水位以下の地盤の間隙水圧と異  
 なり、不飽和地盤のサクシオンとGの関係の合理的な解  
 釈は難しい。

図-7は10Gの下で降雨実験を行った時の間隙水圧の変  
 化を示している。横軸は降雨開始からの時間である。降雨  
 開始とともに急激に負の間隙水圧は-0.8kPaまで減少し、

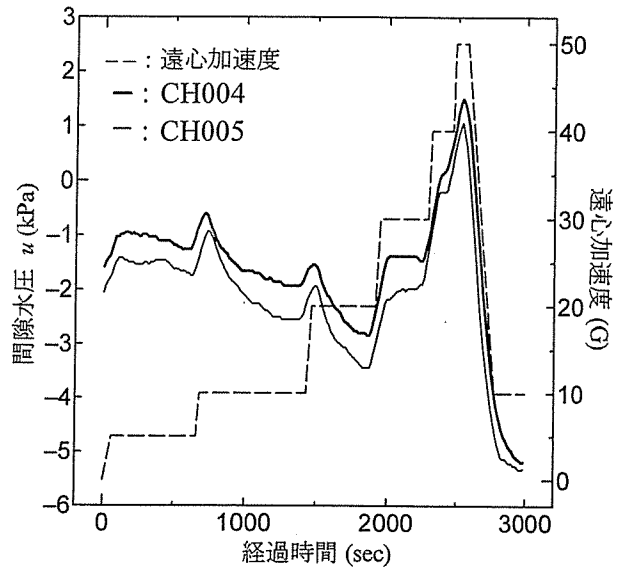


図-6 測定された間隙水圧とGの関係

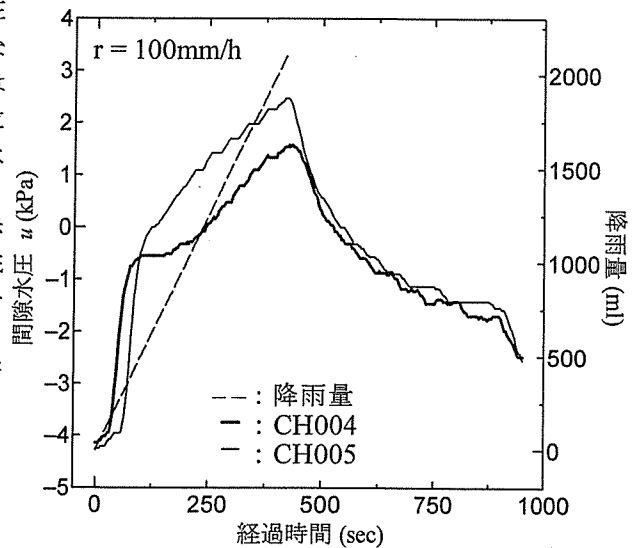


図-7 降雨による間隙水圧の変化

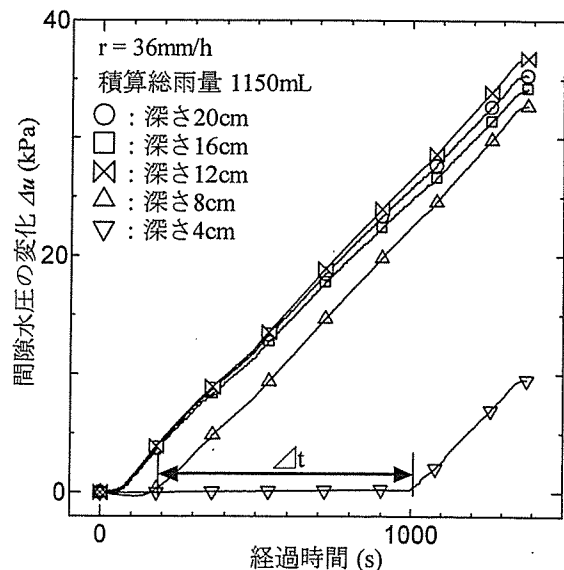


図-8 降雨時の地盤内間隙水圧の変化

その後徐々に正の間隙水圧が発生している。降雨は400秒で終了したが、降雨終了後間隙水圧は時間と共に減少していく。この結果によれば、降雨中ではサクシオンは消滅していることになる。しかし、4.で述べるように角度を45°にした斜面地盤でも、降雨による斜面崩壊は生じなかった。豊浦砂の内部摩擦角は45°より小さいので、サクシオンがなければ、45°の斜面は保持できない。このことは、45°の斜面を保持できるだけのサクシオンが降雨中でも生じていたことになる。

### 3.2 降雨による地盤内の間隙水圧の変化

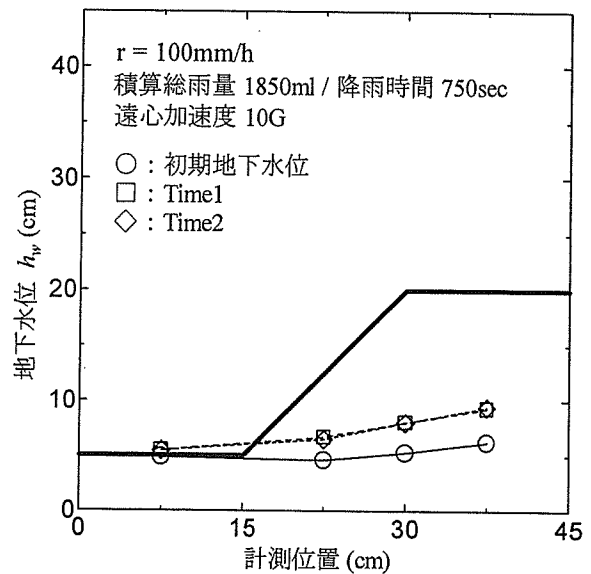
図-8 に代表的な降雨時の地盤中の間隙水圧の変化を示す。遠心加速度は50Gで、地盤中に設置している間隙水圧計の読みが一定となつてから、降雨実験を行った。図の縦軸は、降雨開始からの間隙水圧の増分を示す。地下水位より下の深度では降雨とともに間隙水圧が増加している。地下水位より上に設置された間隙水圧計は、ある時間経過後に(図中では $\Delta t$ と表示)、間隙水圧が増加し、その後は地下水位より下の深度にある間隙水圧計と同じ勾配で間隙水圧が増加している。これは、降雨によって供給された水分が、地下水位面より上の不飽和状態の土粒子によって、吸収されることなしに、下方に移動していることを示している。

今回の実験では1Gの場で飽和度50%の均一な地盤を作成した。豊浦砂のような比較的粗い粒子からなる地盤の場合には、水分の付着は土粒子間の空隙に働く毛管張力によるものと思われる。Gの増加による土粒子の移動を無視できるとすると、Gによらず土粒子の間に働く毛管張力は一定となる。しかしながら、Gの増加に伴い水の単位体積重量が増加するので、その分水分は下方に移動する。今回は、この状態から降雨実験を行ったので、降雨によって供給された水分は土粒子の表面や空隙に吸収されることなしに下方に移動するものと考えられる。したがって、地下水位が目にする間隙水圧計の位置まで上昇しないと、間隙水圧は変化しない。しかし、地下水位が測定深度より上に来ると、降雨によって間隙水圧は一様に上昇する。しかし、地下水位面より上の地盤を乾燥させた状態、あるいは降雨開始前に長期間水分を蒸発させた状態で実験を開始すると、水分が土粒子の空隙に消費されるので、図-8に示した曲線と異なることが予想される。今回の実験では、土槽上部には降雨のためのノズルを取り付けた蓋を被せたので、実験中蒸発による影響は小さいと考えられる。

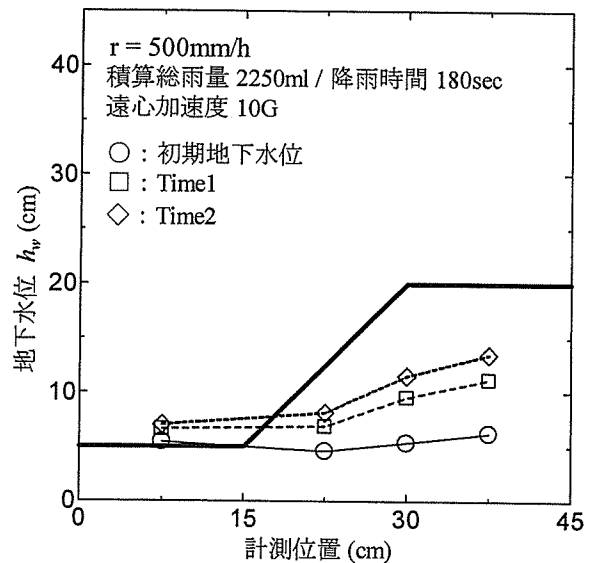
## 4. 斜面地盤の実験結果

### 4.1 実験結果

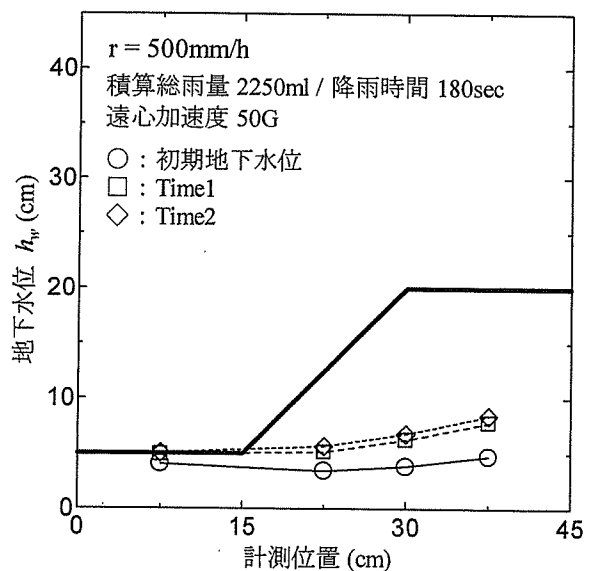
図-9に降雨開始前と降雨時の地下水位を示す。地下水位は、土槽底面に取り付けられた間隙水圧計によって測定された間隙水圧から、間隙流体の $\rho_w$ を $1.0\text{g/cm}^3$ として算出した。実験方法で述べたように、斜面底部の左側面に排水



(a) 降雨強度 100mm/h, 10G



(b) 降雨強度 500mm/h, 10G



(c) 降雨強度 500mm/h, 50G

図-9 積算降雨量が同じ時の地下水位の位置

溝を設けたので、底部の地表面と地下水位は一致する。図から、降雨開始前でも斜面側の地下水位の位置が高いことがわかる。これは模型土槽を図-9に示す平面が遠心力荷装置の回転軸の方向と同じとなるように設置しているためである。すなわち、回転軸（模型土槽から1.5mの位置）を中心として、放射状に遠心加速度が作用しているために、見かけ上、地下水位は水平とはならない。

降雨時の地下水位は、積算雨量 ( $r \times t$ ) が同じとなる時間(図中ではTime1およびTime2として記載)をプロットした。また、CCDカメラによる観測によれば、降雨による水分は地表面を流れることなく、全て地盤内に浸透した。

図-9に示す結果を見てみると、以下のことがわかる。①同じ遠心力加速度の条件では、降雨強度が大きいほど斜面の地下水位は高くなる。②同じ降雨強度で遠心力加速度が異なる場合では、加速度が大きくなるほど地下水位の位置は低くなる。これは、以下のように解釈できる。降雨によって斜面に浸透した水分は遠心加速度によって鉛直方向ばかりではなく、水位が低い斜面底部へ移動する。この水平方向の水の移動は、Darcy則が示すように、時間当たりの水平方向に移動できる水の量には制限があるので、この制限以上に降雨強度が大きければ、地下水位が上昇することになる。また、同じ降雨強度でも遠心力加速度が大きければ動水勾配が大きくなるので、水平方向に水が移動できる量が増えることになり、地下水位の上昇速度は遅くなる。

#### 4.2 相似則

遠心力荷試験を行う際に、模型と実物との相似則を満足させる必要がある。これまで、遠心力荷試験の対象とした地盤の多くは飽和地盤であり、不飽和地盤の相似則については、未だ不明な点が多い。地下水位より下の地盤の間隙水圧は遠心加速度に比例して増加するので ( $G$ によって多少間隙流体の  $\rho_w$  単位体積質量が異なるが)、遠心力荷試験で用いられている通常の縮尺モデルが成り立つものと思われる。一方、今回の実験で示したように(例えば図-6)、 $G$ と不飽和地盤中の間隙水圧の関係を従来の相似則で説明することは難しい。今回得られた試験結果が、サクシオンが模型地盤に生じているのに測定方法の問題があるので適切に測定ができない?あるいは不飽和地盤では縮尺、遠心加速度、応力(サクシオン、有効応力)の関係が成り立たない?のどちらかを示している。この点については、今後さらなる研究を進める必要がある。

斜面の地下水位の上昇については、表-2に示す相似則が成り立つと考えられる。すなわち、実物と同じ降雨強度で散水すると、加速度が大きい分、実物より早く間隙水圧(すなわち地下水位)が上昇する。したがって、縮尺を  $1/n$  とした場合には、 $nG$ の遠心加速度を模型地盤に荷し、実物と同じ降雨強度  $r$  で散水し、模型での時間  $t$  を  $nt$  とすれば、実物における時間となる。すなわち、模型では  $n$  倍早く地下水位が上昇する。

相似則の確認は、Modeling of model の手法が有効である。

すなわち、異なった  $G$  において、これに相当する縮尺モデルで実験を行い、得られた結果が同じであることを確認する手法である。今回行った実験は  $20G$  のもとで斜面高さ  $15\text{cm}$  (実物に換算すると  $15\text{cm} \times 20 = 3\text{m}$ )、 $40G$  のもとで斜面高さ  $7.5\text{cm}$  ( $7.5\text{cm} \times 40 = 3\text{m}$ ) の模型を作成し、降雨実験を行った。降雨強度はいずれも  $200\text{mm/h}$  である。横軸を実物の時間 ( $nt$ ) で整理すると、降雨による間隙水圧の上昇過程は  $20G$ 、 $40G$  とも同様な関係が得られているのがわかる(図-10)。表-2に示す相似則では降雨強度は  $G$  (縮尺)によらず一定とした。降雨強度の単位は  $\text{mm/h}$  であり、これを実物に換算すると、寸法は  $n$  倍、また時間も  $n$  倍である。すなわち、 $(n \times \text{mm}) / (n \times \text{h})$  であるので、結局  $\text{mm/h}$  と同じ次元を有するので、実物と模型では降雨強度は変えなくても良いことになる。

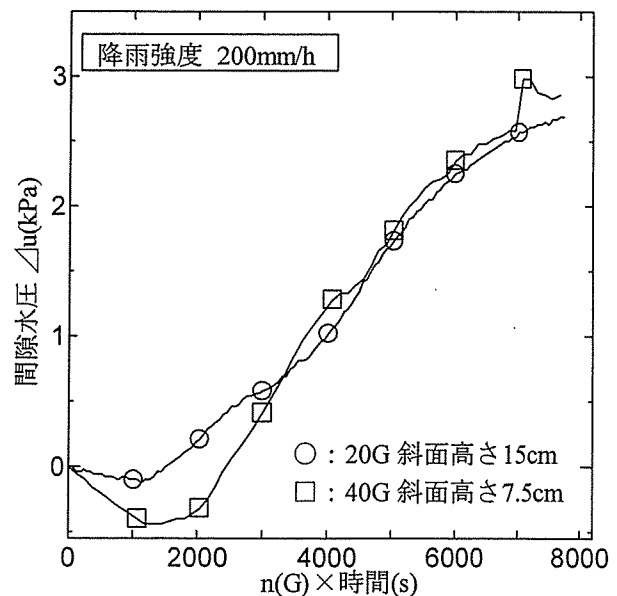
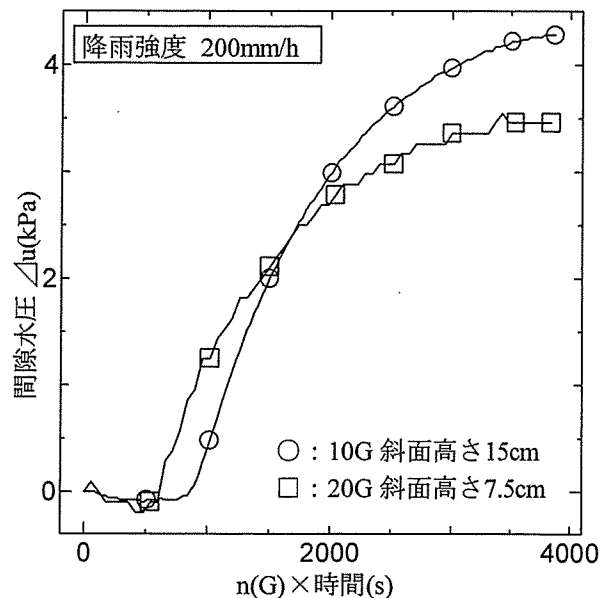


図-10 相似則の確認の結果

表-2 斜面地盤の降雨試験の相似則

	模型	実物
寸法	1/n	1
加速度	n	1
土被り圧	1	1
サクシオン	?	?
時間	n	1
降雨強度	1	1

## 5. まとめ

遠心力載荷実験による不飽和地盤の再現を試みた。飽和度を 50% に調整した豊浦砂に遠心加速度を加えることによって、地下水位に区切られた飽和地盤と不飽和地盤を作成することができた。しかしながら、不飽和地盤のサクシオンについては不明な点が多く、今後のさらなる検討が必要である。斜面地盤の降雨による地下水位の上昇を再現させるための、相似則を提案した。すなわち縮尺が  $n$  の模型には加速度  $nG$  を加え、実物と同じ降雨強度で散水した場合には、模型における時間は  $n$  倍とすると実物に換算することができる。

## 謝辞

本研究は、厚生労働科学研究費（労働安全衛生総合研究事業）「斜面崩壊による労働災害防止に関する研究」の補助を受けて実施された。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：不飽和土の挙動と評価，2004.
- 2) 太田直之，阿知波秀彦，杉山友康，布川修：模型盛土を用いた散水実験による水位上昇特性，第 39 回地盤工学研究発表会，pp.2119-2120，2004 年
- 3) Edwin GARCIA, Chaminda GALLACE, Taro UCHIMURA: Effect of barrier on artificial embankments reinforced with geosynthetics

subjected to rainfall, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.2375-2376, 2005 年

- 4) G.Bagge, D.Konig & A.Rezzoug et al. ; Centrifugal modeling of capillary rise and drainage in sandy soils, Physical Modeling in Geotechnics : ICPMG'02, Philips, Guo & Popescu(eds.), pp.343-348, 2002.
- 5) 阿部廣史：不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究，東京大学学位申請論文，1994.
- 6) Mitachi, T., Kudoh, Y. and Tsushima, M.: Estimation of In-situ undrained shear strength of soft soil deposits by use of unconfined compression test with suction measurement, Soils and Foundations, Vol. 41, No.5, pp. 61-71, 2001..

## Slope stability during rainfall using centrifuge test

Hiroyuki TANAKA<sup>1</sup>, Atsushi ABE<sup>2</sup>, Taiki KASAMA<sup>1</sup>, Toshiyuki MITACHI<sup>1</sup>

1 Hokkaido University

2 NTT East Japan

## Abstract

Centrifuge tests were carried out to study the rise of ground water table during rainfall for unsaturated sandy ground. To simulate the unsaturated ground, the model ground was created by compacting Toyoura sand with void ratio of 0.8 and saturation of 50%. It was confirmed that when the large acceleration was subjected to the model ground, the ground water table was observed. Below the water table, the pore water pressure increased with increase in depth. However, the values of suction in the unsaturated zone were rather small or nearly equal to zero. The rise of the water table in the slope was observed under various intensity of rainfalls and centrifugal accelerations. From these test results, similarity rule was derived.

Key words: unsaturated ground, ground water table, rain fall, centrifuge test

## 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<sup>1)</sup>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  $10^{-1}\text{cm/s}$  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<sup>1)</sup>と同様の斜面角度  $45^\circ$ 、斜面高さ 15cm で実験を行った。

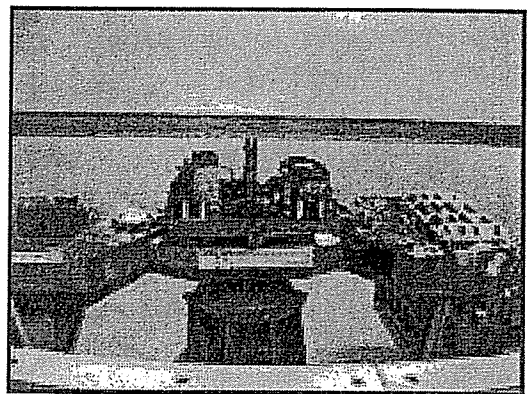


図-1 遠心模型実験装置

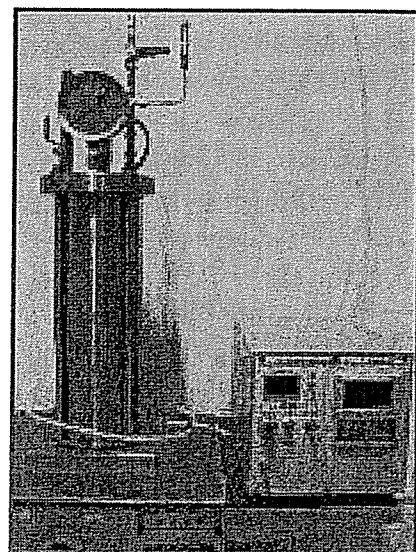


図-2 散水装置

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 つ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  $-2 \text{ kPa}$  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  $-6 \text{ kPa}$ , 深さ 7.5cm において  $-2 \text{ kPa}$  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。

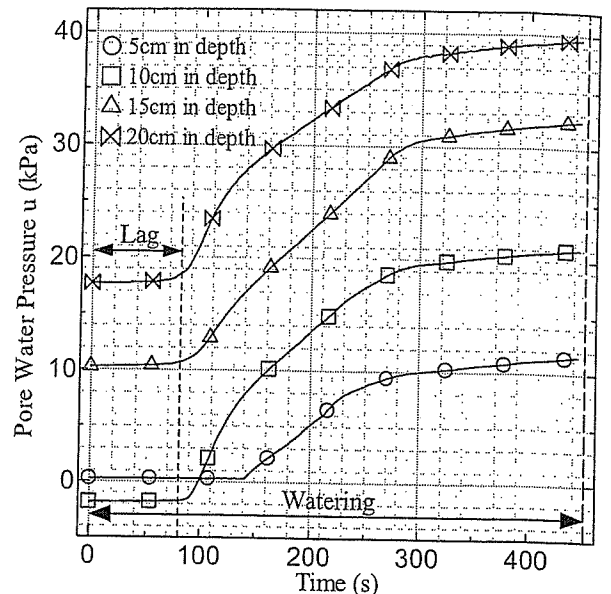


図-3 間隙水圧変化 (実験①)

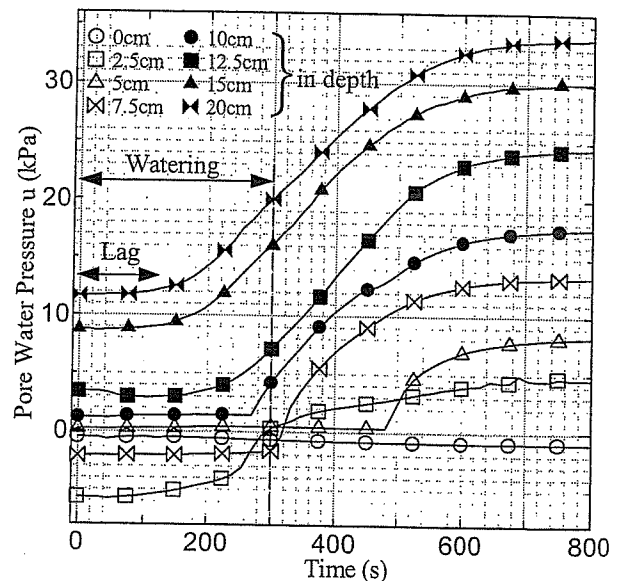


図-4 間隙水圧変化 (実験②)

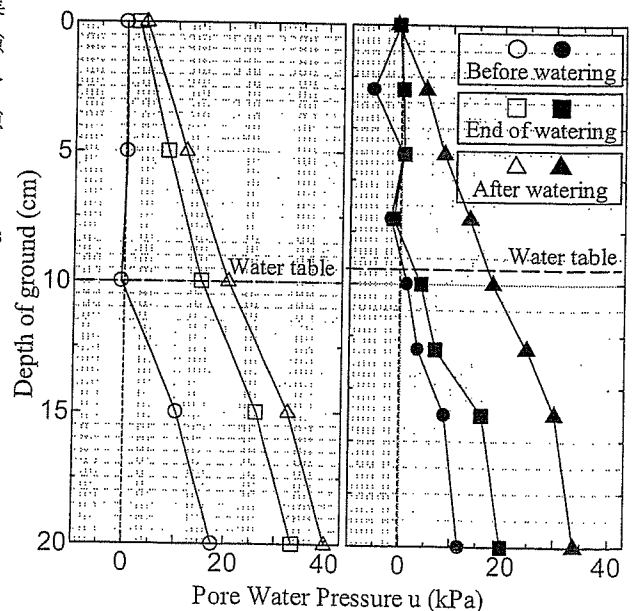


図-5 深さ方向の間隙水圧分布 (左: 実験① 右: 実験②)

## 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ことが予想されたので, 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.

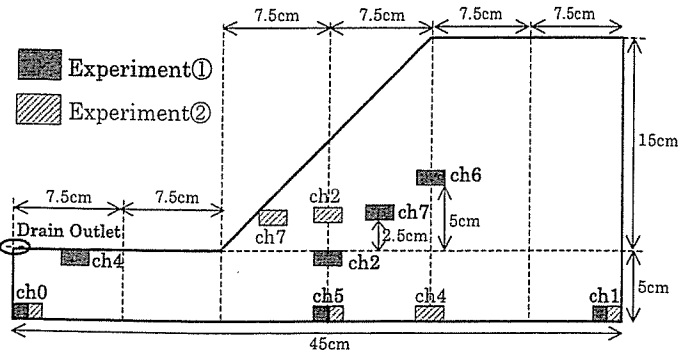


図-6 模型寸法と間隙水圧計設置位置

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, 散水バルブの性能にあり, 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 270 秒後), 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, 飽和度になると 36~40% であった.

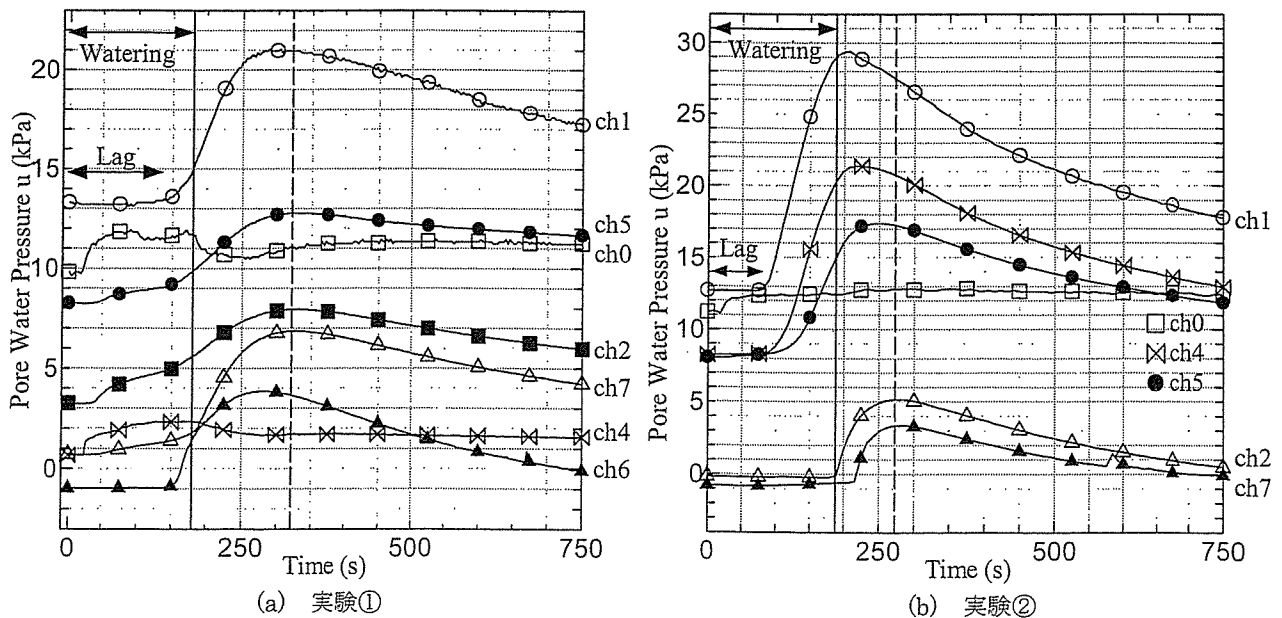
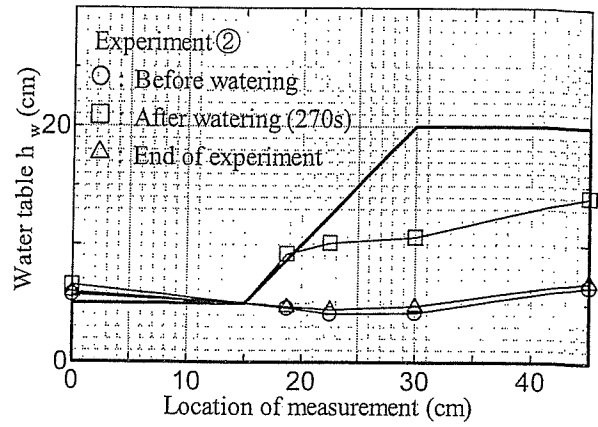
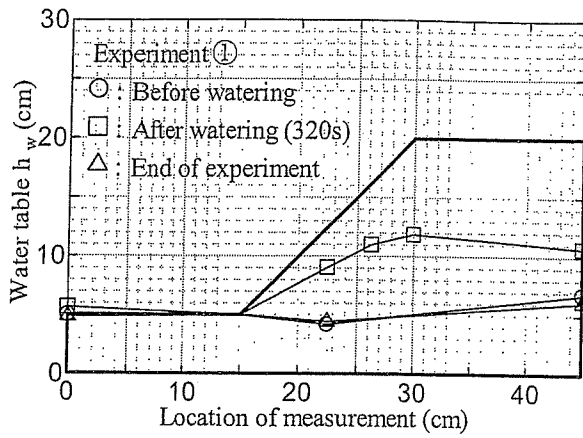


図-7 間隙水圧変化



(a) 実験①

(b) 実験②

図-8 地下水面変化

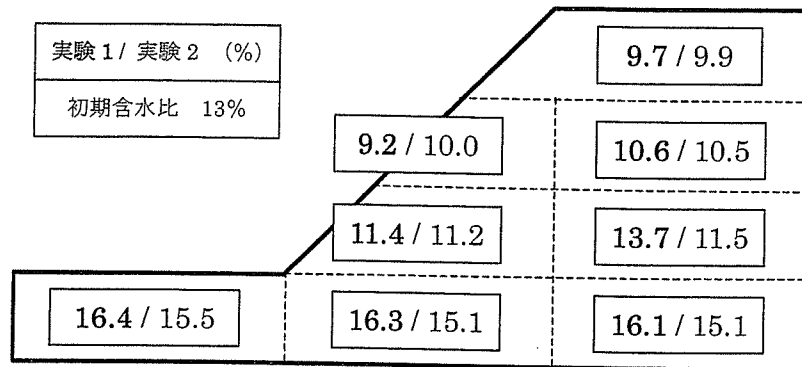


図-9 含水比変化

## 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ョンが計測された。このサクショ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、サクショ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ョンは大きくなる。

### 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、せん断応力荷型、主応力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<sup>1)</sup> 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。

AFM<sup>2)</sup> 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方式の AFM を用いた。図 1 に動作原理を示す。この方式は 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<sup>3)</sup> 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 ( $1\text{nN}=1\times 10^{-6}\text{N}$ ) オーダーである。

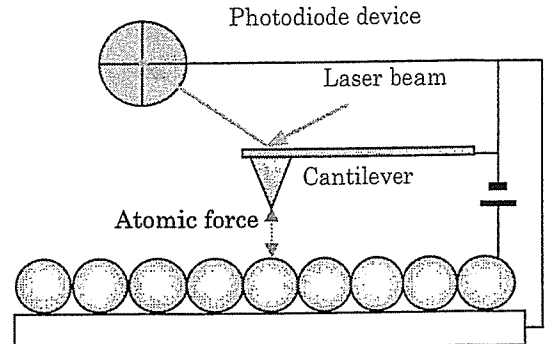


図 1 原子間力顕微鏡の動作原理

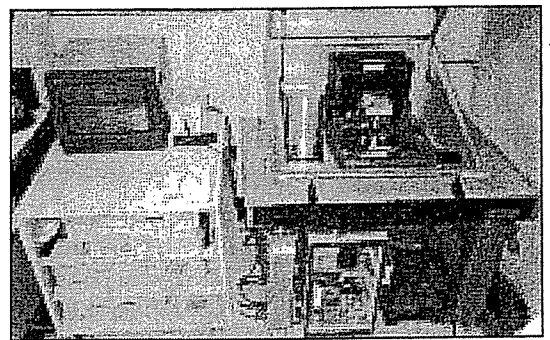


写真 1 原子間力顕微鏡

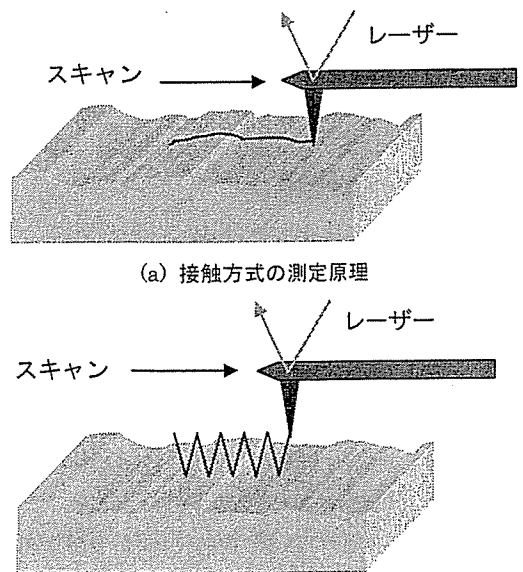


図 2 AFM の動作方式の原理

Surface Analysis and Friction Force Measurement of the Shear Surface at the Residual State of Clay Using AFM.  
 Takehiro HISATSUNE (Undergraduate Student, Iwate University), Masafumi OKAWARA (Iwate University),  
 Toshiyuki MITACHI (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

(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  $\phi$  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  $\phi$  を求めた。摩擦角  $\phi$  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 (クニミネ工業) 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、

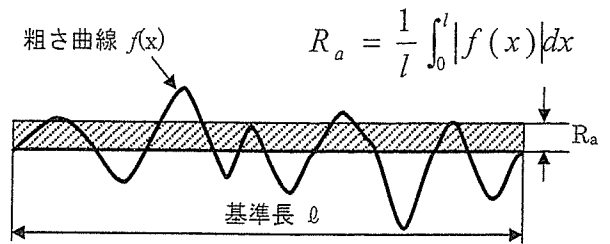
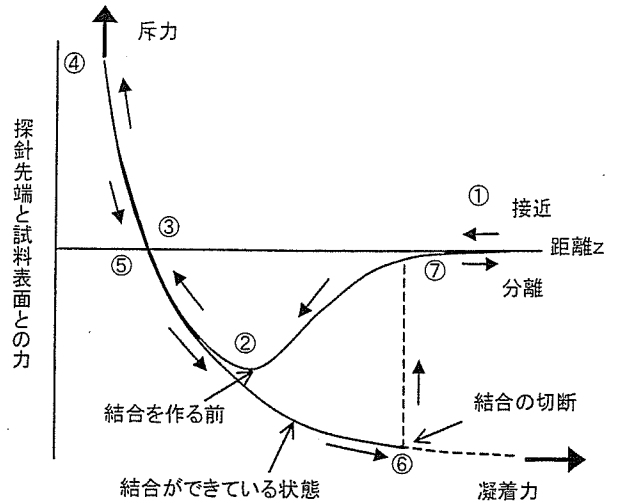
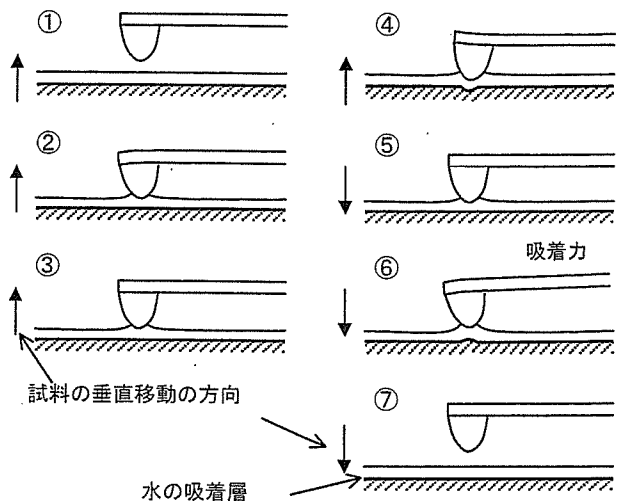


図 3 算術平均高さの  $R_a$  概念図



(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<sup>2)</sup>

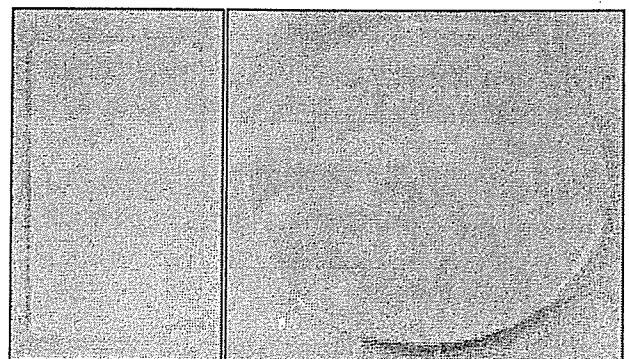


写真 2 水簾試料写真

(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)、 $\Delta A$  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  $0.4\text{V}$ 、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。

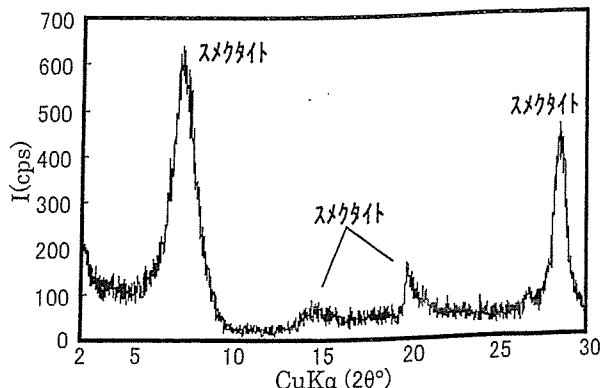


図 5 クニピア-F の X 線プロファイル

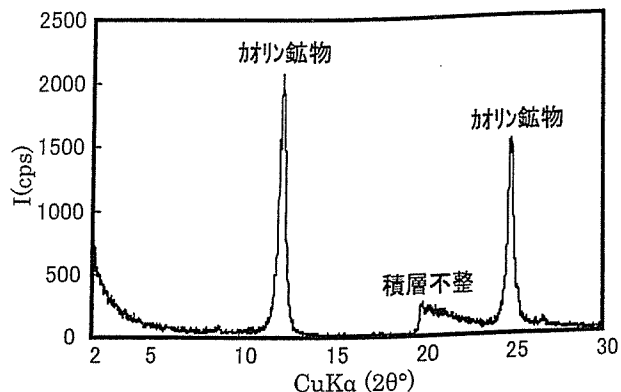


図 6 カオリン-KH の X 線プロファイル

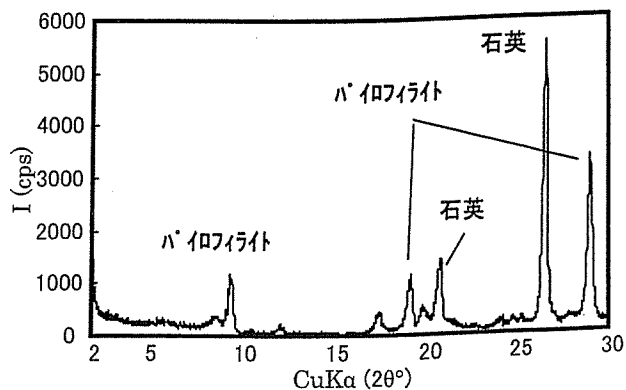


図 7 NSF 粘土の X 線プロファイル

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

(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。

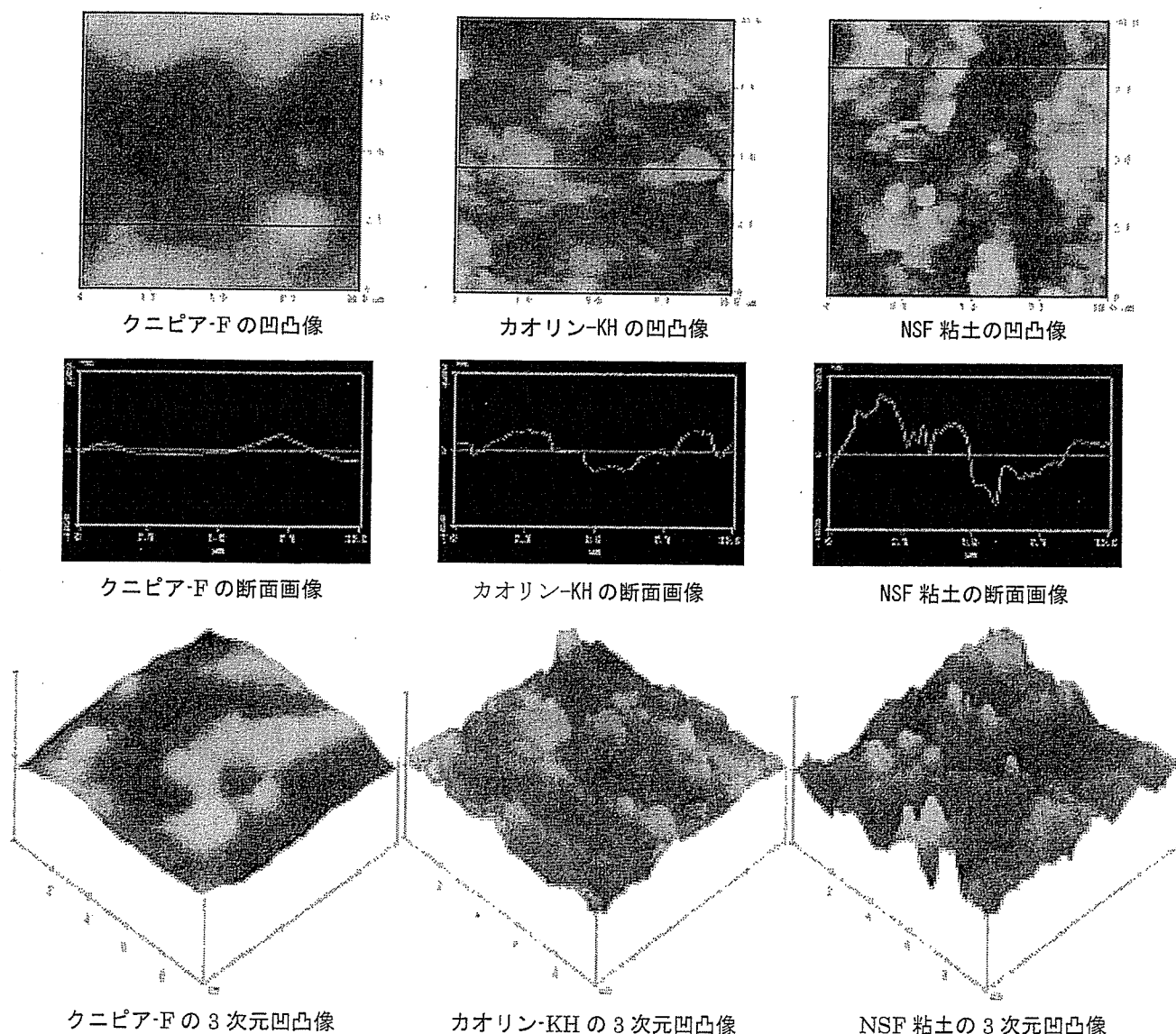


図 8 粘土の残留状態せん断面の AFM 測定結果

表1 残留状態せん断面の表面解析結果

kunipia-F		kaolin-KH		NSF-clay	
Ra (nm)	RIA (%)	Ra (nm)	RIA (%)	Ra (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

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。

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 Rz、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 (Ra=263.7nm, RIA=30.8%) >カオリン-KH (Ra=153.4nm, RIA=22.6%) >クニピア-F (Ra=47.9nm, RIA=0.69%) であった。

(2) 粘土の摩擦測定

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。摩擦力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力が得られているシリコンウエハを測定し、得られた電圧(mV)と摩擦力(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 ともに垂直荷重と摩擦力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 ともに摩擦角  $\phi$  は非常に小さく、垂直荷重の増加による大幅な摩擦力の増加は期待されない。

つぎに AFM により得られた摩擦角  $\phi$  と大変位一面せん断試験のせん断抵抗角  $\phi'_r$  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  $\phi$  とせん断抵抗角  $\phi'_r$  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  $\phi$  とマクロ領域における  $\phi'_r$  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<sup>5), 6), 7)</sup>。

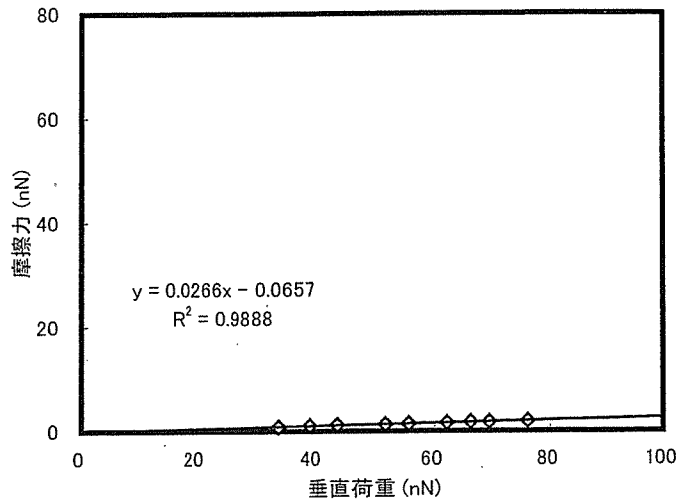


図 9 クニピア-F の垂直荷重-摩擦係数関係図

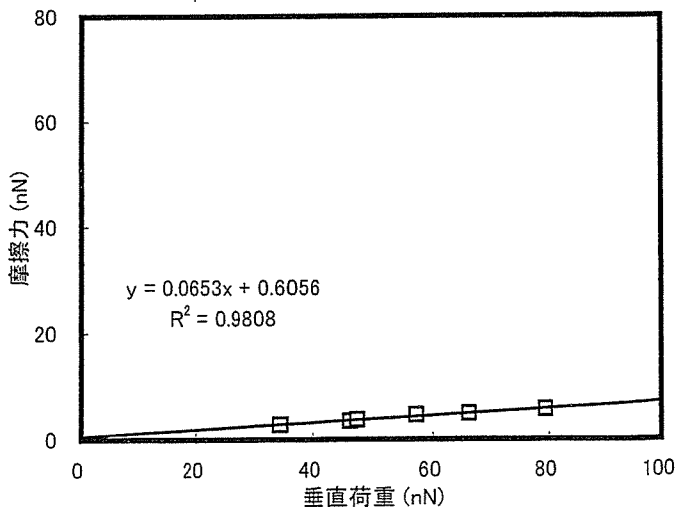


図 10 カオリン-KH の垂直荷重-摩擦係数関係図



### (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。Rode<sup>3)</sup>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  $10 \sim$  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形で、空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。

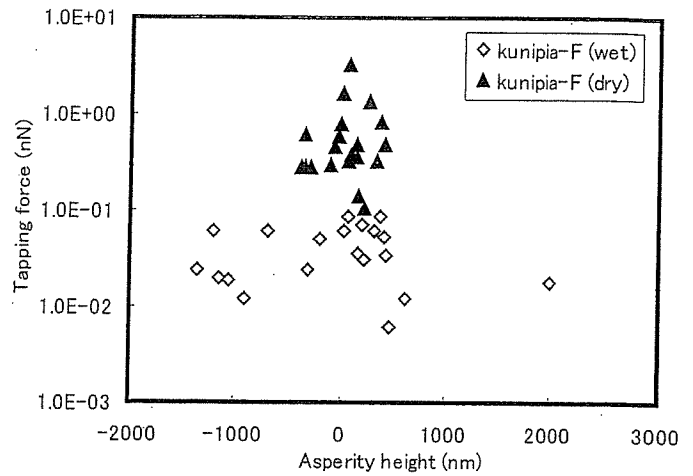


図 11 クニピア-F の吸着力測定結果

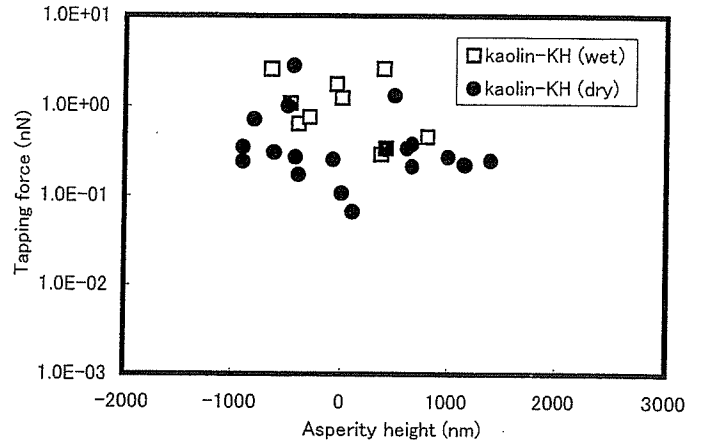


図 12 カオリン-KH の吸着力測定結果

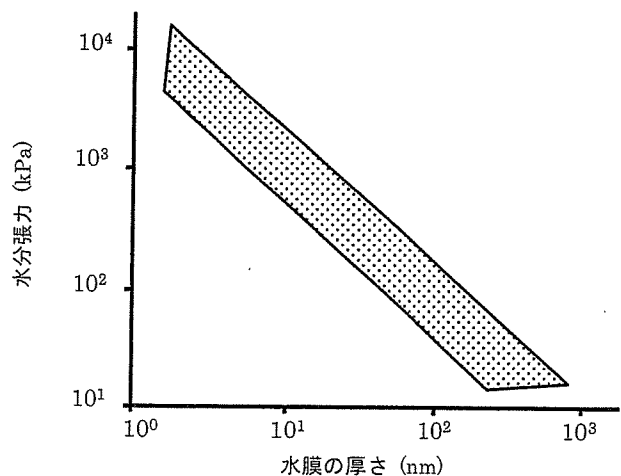


図 13 吸着力の結合強さと水膜の厚さとの関係<sup>4)</sup>

(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  $\mu$  および摩擦角  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  が大きくなるようにみえる。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  $\phi$  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 ( $R_a=263.7\text{nm}$ ,  $RIA=30.8\%$ )  $>$  カオリン-KH ( $R_a=153.4\text{nm}$ ,  $RIA=22.6\%$ )  $>$  クニピア-F ( $R_a=47.9\text{nm}$ ,  $RIA=0.69\%$ ) 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  $\phi^* = 19.0^\circ$  , カオリン-KH が  $\phi^* = 24.9^\circ$  ) 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。

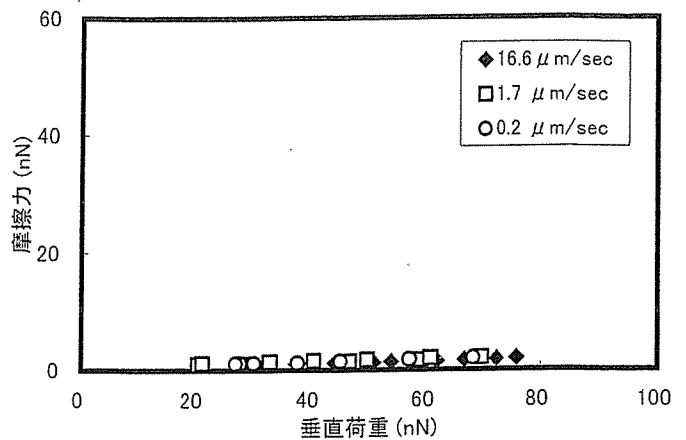


図 14 クニピア-F の垂直荷重-摩擦力関係図

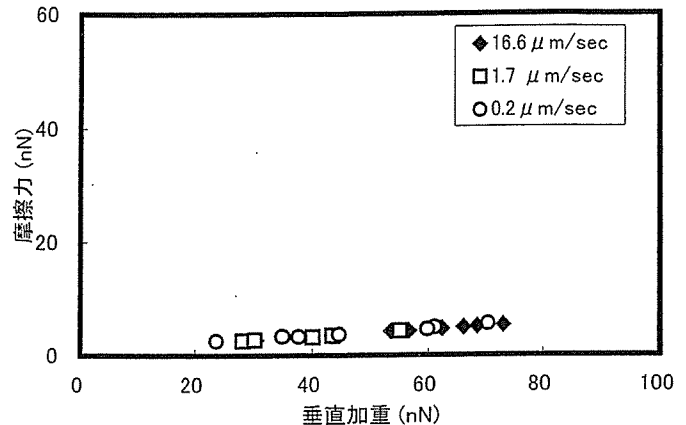


図 15 カオリン-KH の垂直荷重-摩擦力関係図

表 2 クニピア-F の摩擦係数  $\mu$  および摩擦角  $\phi$

走査速度 ( $\mu\text{m/sec}$ )	摩擦係数 $\mu$	摩擦角 $\phi$
16.6	0.0205	$1.17^\circ$
1.7	0.0206	$1.18^\circ$
0.2	0.0214	$1.23^\circ$

表 3 カオリン-KH の摩擦係数  $\mu$  および摩擦角  $\phi$

走査速度 ( $\mu\text{m/sec}$ )	摩擦係数 $\mu$	摩擦角 $\phi$
16.6	0.0626	$3.58^\circ$
1.7	0.0634	$3.63^\circ$
0.2	0.0624	$3.57^\circ$

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。

摩擦力測定では、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 $\phi$ は応力により算出されるが、本研究での摩擦力測定においては、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、摩擦力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

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

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

せん断抵抗係数  $\tan \phi$  は、土のせん断特性を表すパラメータとして大変重要である。 $\tan \phi$  は、垂直応力の増減に対するせん断応力の増減率を表し、せん断強度の種類ごとにピーク強度には  $\tan \phi_p$ 、完全軟化強度には  $\tan \phi_s$ 、残留強度には  $\tan \phi_r$  と表記される。ピーク強度とは過圧密粘土の最大せん断強さ、完全軟化強度とは繰り返し粘土を正規圧密して得られた最大せん断強さのことで、通常せん断強度といえどどちらか一方をさす。残留強度は大変位せん断後に得られる最小せん断強さで応力履歴やせん断速度の影響を受けないようである。Mitachi et al. (2003)<sup>1)</sup> によると、残留状態でのせん断抵抗係数  $\tan \phi_r$  が現在のところ最も真の値に近いと考えられているボルスレフのせん断抵抗係数  $\tan \phi_s$  に等しいとみており、 $\tan \phi_r = \tan \phi_s$  が正しいとすれば種々あるせん断強度のなかで残留強度こそが真のせん断強さと呼ぶに相応しい強度になる。ところで残留状態とは、大きなせん断変位を受けてせん断強度が定常値に収束した状態のことで、せん断面は粒子配向により一般に平滑になっている。このように残留状態でのせん断現象とは、巨視的には平らな面同士の摩擦現象と考えられるため、 $\tan \phi_r$  のメカニズムの解明には摩擦研究から得られた知見が有効と考えた。摩擦とは、「接触している二物体が相対的に運動し、または運動し始めるとき、その接触面で運動を妨げようとする向きに力の働く現象、またはその力」<sup>2)</sup> と定義され、アモントン・クーロンの法則が実用的な摩擦条件のもとで成立する<sup>3)</sup>。この法則は、摩擦力を  $F$ 、垂直荷重を  $N$  とすると  $F = \mu N$  と表され、 $\mu$  は見かけの接触面積にもすべり速度にも無関係であるというものである。 $\mu$  を摩擦係数といい摩擦の度合いを定量的に表すパラメータで、せん断現象が摩擦現象であるとするれば  $\tan \phi$  は  $\mu$  の一種ということになる。摩擦を取り扱う学問・技術分野であるトライボロジーでは、摩擦係数  $\mu$  が存在する理由、すなわち垂直力に摩擦力が比例する理由を次のように説明している。物体がある平滑な面で接触しているとき、接触している面は一見すると全面接触しているようにみえる。しかし実際には部分的に接触しているに過ぎず、そのため物体をずらしたときに生じる摩擦力は、この接触部分で発揮される摩擦力の総和となっている。ここで接触部分を「真実接触面(もしくは真実接触点)」といい、真実接触面積が垂直荷重の増加に伴い増えるため全体の摩擦力も大きくなるというのである(図1)。残留状態でのせん断現象が摩擦現象であるとするれば、アモントン・クーロンの法則が成立するとともに摩擦係数  $\mu$  にされた説明がせん断抵抗係数  $\tan \phi$  にも適用できると考える。そこで本研究では、残留状態でのせん断抵抗係数  $\tan \phi_r$  のメカニズムの解明を目的に、残留強度に対するアモントン・クーロンの法則の適用性の検証ならびに真実接触面の存在と垂直荷重との関係について検討した。

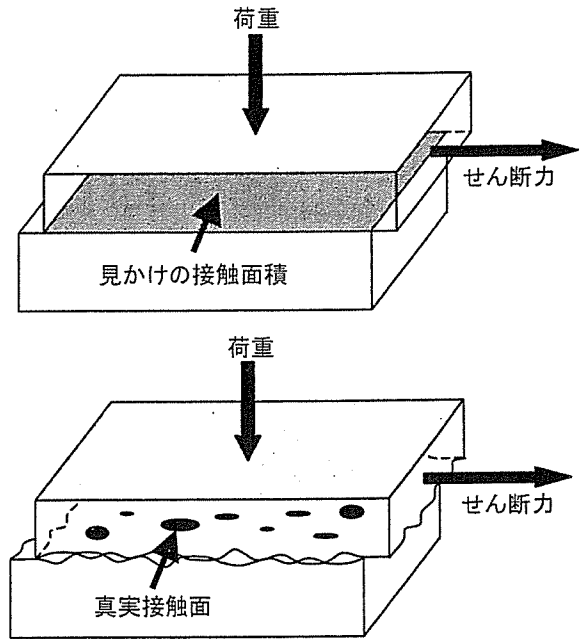


図1 見かけの接触面積と真実接触面(点)の概念図

表1 カオリンKHとクニピアFの各種物性値

	カオリンKH	クニピアF
塑性指数 $I_p$	$\cong 0$ ( $w_p \cong w_L = 24.4\%$ )	774.8 ( $w_g \cong 117.2\%$ , $w_l \cong 892.0\%$ )
CEC (cmol/kg)	9.2	105.4
膨潤性	無	有
$\tan \phi' r$	乾燥	24.9°
	湿潤	14.1°
		19.0°
		2.3°