

吸水によるサクシヨンの消失が低拘束圧下の粘土のせん断強度特性に与える影響

加藤正司¹・譽田孝宏²・新海博之³

¹正会員 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:skato@kobe-u.ac.jp

²正会員 地域地盤環境研究所 地盤解析グループ (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

³正会員 東邦ガス 都市エネルギー営業部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19-18)

本研究では、飽和・不飽和状態のカオリン予圧密試料及び不かく乱沖積粘土試料を用いて、圧縮・除荷後、ならびにそれに吸水過程を加えた等方圧縮過程後の低拘束圧下での非排水せん断試験を実施した。そして、破壊に至るまでの有効応力経路、ならびにピーク強度や残留強度に検討を加えた。その結果、ピーク強度特性や有効応力経路には、サクシヨンによる弱い粒子間付着力や長期の堆積過程により形成され、構造を生じる強い粒子間付着力が影響する傾向が認められた。また残留強度特性は、サクシヨン応力を考慮した平均基底主応力により飽和・不飽和状態にかかわらずユニークに整理される傾向を示した。さらに、吸水過程によりサクシヨンが消失する場合のせん断強度低下量の予測方法について検討を加えた。

Key Words : wetting process, shear strength, residual strength, suction, low confining pressure

1. はじめに

斜面表層部の地盤は不飽和状態となっている場合が多く、その力学特性はサクシヨンの影響を受けているものと考えられる。また、自然斜面に存在する崖錐堆積物の場合は、間隙比が大きい、ゆるい土構造を持つ場合がある。このため、豪雨時にはサクシヨンの消失の影響によりゆるい土構造が崩壊し、これが斜面全体の崩壊原因の一つとなっていることが推測されている¹⁾。このような現象は、不飽和状態のゆるい構造を持つ土の、浸水による強度低下問題ならびにコラプス(浸水時の体積圧縮現象)問題として捉えられ、従来、多くの研究がなされている^{2), 3)}。

一方、都市部における地中構造物およびその基礎の建設のための掘削工事の際には、掘削地盤の表面付近は除荷を受けた状態となる。掘削面が地下水位以下の場合には、釜場排水などの地下水処理が行なわれ、掘削地盤表面は飽和に近い不飽和状態で除荷を受ける。さらに、地下鉄工事などで開削工事が行われる時には、掘削された地盤表面は雨水などの供給を受ける。この時、掘削面付近の地盤は吸水により強度低下を生じる場合がある⁴⁾。このようなケースでは、堆積により生成された密な土構造を有する土が、飽和に近い不飽和状態で除荷により負の間隙水圧(サクシヨン)を生じ、さらに吸水によるサクシ

ヨンの減少・消失のため強度低下を生じていることになる。しかし、どの程度の強度低下を生じるか、また、その強度低下後の土のせん断特性に関しては未解明な点が多い。これらの点が解明されれば、掘削時に施工される土留め工などの実務設計において、有用な情報となるものと考えられる。

本研究では、三軸圧縮試験装置を用いて、予圧密粘土試料ならびに不かく乱粘土試料について、等方圧縮、除荷、吸水過程を実施し、低拘束圧下での非排水状態のせん断試験を行った。そして、除荷時に有するサクシヨン、ならびに吸水過程によるサクシヨンの変化が、低拘束圧下におけるせん断強度特性に与える影響について検討を加えた。合わせて、吸水による強度低下量の推定方法に関して検討を行った。

なお、以下では特に断らない限り、次の応力記号を用いる。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; 全応力表示の主応力,

σ_c ; 等方圧縮過程での圧縮応力,

u_a, u_w ; 間隙空気圧および間隙水圧,

$\sigma_i - u_a$; 基底主応力 ($i=1,2,3$)⁵⁾,

$s = u_a - u_w$; サクシヨン,

$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; 平均主応力,

$p^* = p - u_w$; 平均有効主応力,

$p_{net} = p - u_a$; 基底主応力による平均主応力,

$q = \sigma_1 - \sigma_3$; せん断応力,

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s ; \text{サクシオン応力}^{(6)}, \text{ただし, } S_r,$$

S_{r0} は、飽和度および残留飽和度。

また、以上の応力記号の前に記号 Δ が付いたものは、その応力の変化量を示すものとする。

2. サクシオン消失がせん断強度特性に与える影響

(1) 吸水過程におけるサクシオンの変化

土塊の持つサクシオンと水分量の関係は、水分特性曲線と呼ばれる(図-1参照。なお、図中の S_{r100} は、飽和状態の飽和度を表す。また、図中のメニスカス水、バルク水に関しては文献6)を参照のこと。) 飽和状態からサクシオンが増加する場合と、サクシオン増加後、減少する場合は水分特性曲線は異なる曲線を描き、ヒステリシスを示す。サクシオン増加時と減少時の水分特性曲線をそれぞれ、排水曲線および吸水曲線と呼ぶ。また、水分特性曲線の形状の変化点におけるサクシオンの値をそれぞれ、空気侵入値および水侵入値と呼ぶ。さらに、飽和状態からのサクシオンの増加過程とそれに続く減少過程により得られる水分特性曲線はそれぞれ主排水曲線、主吸水曲線と呼ばれ、途中段階からのサクシオンの増加、あるいは減少過程により得られる水分特性曲線は走査曲線と呼ばれる。なお、水分特性曲線の形状に関しては、間隙比、土構造ならびに応力状態の変化が影響を及ぼすことが知られている^{7), 8), 9)}。

飽和状態にある地盤の地表面を掘削した場合、応力の除荷により負の間隙水圧(サクシオン)を有した状態となる。その後、雨水などの供給を受けて負の間隙水圧が減少・消失する場合には、負の間隙水圧で定義されるサクシオンと水分量の関係は、走査曲線を経て主吸水曲線上を移動することが予想される。

(2) サクシオン消失によるせん断強度の低下

土塊にサクシオンが作用すると、メニスカスにより生じる粒子間付着力のため、土粒子間の摩擦抵抗が増大し、せん断強度が増加する。Fredlund et al.¹⁰⁾は、不飽和土のせん断強度を表す式として次式を提案している。

$$\tau_f = c_{sat} + (\sigma - u_a) \tan \phi_{net} + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

ここに、 τ_f : 破壊面上のせん断強度,
 σ : 全応力表示の破壊面上の垂直応力,
 c_{sat} : 飽和状態における粘着力,

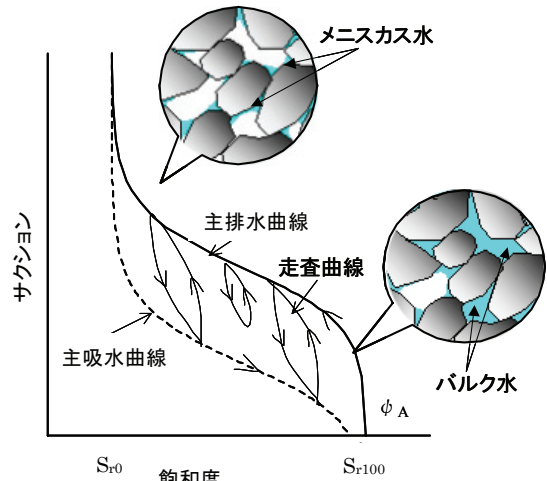


図-1 水分特性曲線の概念図

ϕ_{net} : 基底応力に基づく内部摩擦角,
 ϕ^b : サクシオンの増加に伴うせん断強度の増加を表すパラメーター,
 $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ の項は、サクシオンによる粘着力増分を表す。

また、 ϕ^b の大きさは、サクシオンの大きさが空気侵入値以下の場合、 $\phi^b = \phi_{net}$ となり、空気侵入値よりも大きくなると $\phi^b < \phi_{net}$ となる¹¹⁾。阿部¹²⁾、Vanapalliら¹³⁾は、サクシオンによるせん断強度増分を水分特性曲線から推定する方法について検討している。また、Vanapalliら¹³⁾および軽部ら⁶⁾は、サクシオンによるせん断強度増分 $\Delta\tau_f$ と飽和度の関係を示している。それらは、次式のようにまとめられる。

$$\Delta\tau_f = \left(\frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s \right) \tan \phi_{net} \quad (2)$$

吸水過程で生じるサクシオンの減少や消失によるせん断強度低下を考える場合、吸水を生じる前後の飽和度とサクシオンが分かれば、式(2)を用いてサクシオン消失によるせん断強度低下量を予測することが可能と考えられる。しかし、従来、水分特性曲線とサクシオンによるせん断強度増分の関係に関する研究においては、その多くがサクシオン増加方向の排水曲線に関する実験に基づいて研究が行われてきた。このため、サクシオン減少方向の吸水曲線に関しては、式(2)の適用性も含めて十分な検討が行われていないのが現状である。

(3) サクシオン消失時のせん断強度特性

不飽和土の浸水時の挙動に関しては、コラプスを中心とした体積変化挙動について主に研究がなされ

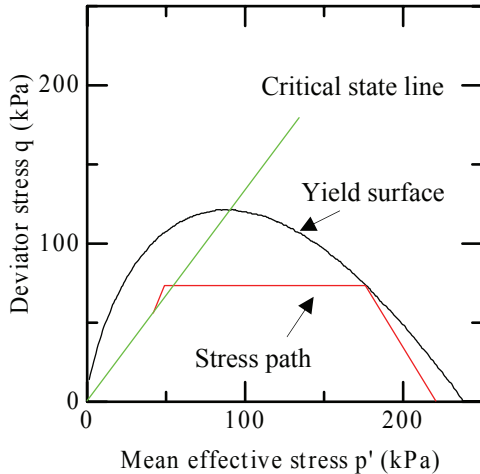


図-2 せん断応力一定条件下の間隙水圧上昇試験での有効応力経路(文献16)中の図面を修正)

てきた²⁾。一方、浸水による強度低下に関してもいくつかの研究がなされている。福田³⁾は、一面せん断試験装置を用いた実験により、過圧密状態の土について浸水による強度低下について検討を行っている。また、宇野・宮下¹⁴⁾および阿部¹⁵⁾は、締め固めの初期乾燥密度に着目して、浸水時の強度低下について考察を行っている。しかし、これらの研究においては、コラプスを生じさせるために高い拘束応力の下での浸水試験を行っている。そして、浸水時のサクシオン減少・消失による強度低下量に関してはコラプスによる間隙比変化の影響も含まれており、本研究で取り上げているような、低拘束圧下の吸水過程でのサクシオン減少・消失のみによるせん断特性への影響を検討したものではないと考えられる。

吸水により有効応力経路がどのような影響を受けるかを把握することは、浸水による斜面崩壊メカニズムなどを検討する上で重要である。大塚ら¹⁶⁾は、豪雨により生じる浸水時の強度特性について調べるために、練り返した粘土試料を用いた三軸圧縮試験において、せん断応力一定条件下における間隙水圧増加試験を行い、得られた有効応力経路について検討を加えている。そして、図-2に示すように、有効応力経路が限界状態線(Critical state line)を越えた時点から、過圧密土に見られる軟化挙動と同様にせん断応力が低下して限界状態線に達する現象を報告している。また、Orenseら¹⁷⁾は、かく乱したシルトまじり砂質土試料を用いて、低拘束圧下でのせん断応力一定条件下における浸水試験を行い、有効応力経路が破壊線に達することを報告している。これらの研究では、浸水時における有効応力経路への影響が検討されており、いずれも有効応力経路が最終的に破壊線に達することが指摘されていることが特徴

表-1 試料の物理的性質

	Kaoline	Alluvial clay
ρ_s (g/cm ³)	2.709	2.545
w_p (%)	33.5	27.8
w_L (%)	20.3	62.4
I_p (%)	13.2	34.6

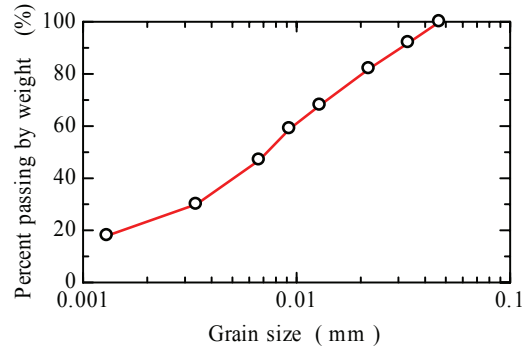


図-3 カオリン試料の粒径加積曲線

である。しかし、本研究におけるように、サクシオン消失のせん断強度への影響に関しては検討されていないものと考えられる。

3. 試料及び実験方法

(1) 試料及び供試体の作製方法

a) カオリン試料の飽和供試体作製方法

本研究では、市販のカオリン試料を用いた。試料の物理的性質を表-1、粒径加積曲線を図-3に示す。気乾状態で粉末のカオリン試料に、含水比が液性限界の1.5倍となるように脱気水を加えてスラリーとした。そのスラリーを容器に入れて真空デシケーター内に設置し、24時間、90kPa以上の負圧を与えて脱気した後に、圧密容器(直径14.5cm、高さ14cm)に移し替えた。その後、ベロフラムシリンダーを用いた載荷装置で上載圧196kPaまで一次元圧密を行った。圧密終了後、圧密容器からブロックサンプルを抜き出し、四分分割してパラフィンコートをし、デシケーター内に保管した。その試料を試験直前にトリマーとワイヤーソーを用いて直径約5cm、高さ約10cmの寸法に成形して、供試体を作製した。このようにして作製された供試体の飽和度は、後掲表-2に示すように90%程度であった。このため厳密には飽和カオリンと呼ぶことはできないが、本論文では次に述べる不飽和カオリン供試体と区別するために、このようにして作製された供試体を「飽和カオリン供試体」と呼んでいる。

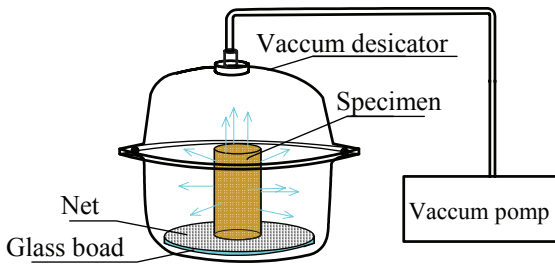


図-4 真空蒸発法による供試体の不飽和化¹⁸⁾

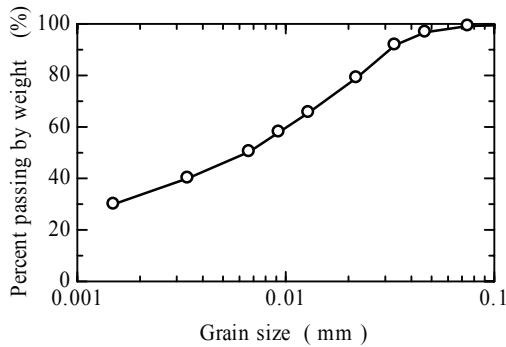


図-5 不かく乱沖積粘土試料の粒径加積曲線

b) 真空蒸発法による不飽和カオリン供試体の作製方法

前項で述べた予備圧密後のブロックサンプルから、井上らによる真空蒸発法¹⁸⁾を参考に、以下のようにして不飽和供試体を作製した。まず、最終的な供試体のサイズ(直径 5cm, 高さ 10cm)よりも少し大きなサイズの円柱形に成形した試料を真空デシケーターに入れ、720mmHg 程度の負圧を与えた(図-4 参照)。そして、所定の載荷時間が経過した後真空デシケーター内の負圧を解除して 6 時間以上放置し、試料内の含水比分布ができるだけ均一となるのを待った。このようにして作製された供試体内の含水比分布は、ほぼ均一であったと報告されている¹⁸⁾。なお、負圧の載荷時間は、予備試験として 24 時間負圧を載荷後、供試体の飽和度を求めておき、載荷時間と飽和度の低下量関係が線形関係を示すという井上らの実験結果¹⁸⁾を参考に、約 50~60%の飽和度が得られる時間を判断して決定した。このようにして不飽和化した試料をトリミング後、供試体として用いた。

c) 不かく乱沖積粘土試料による供試体作製方法

本研究に用いた不かく乱沖積粘土試料は、大阪市内の掘削工事現場から固定ピストン式シンウォールサンプラーで採取され、パラフィンコートが施された 2 種類の不かく乱試料である。この試料をトリミングして直径約 5cm, 高さ約 10cm に成形したものを供試体とした。試料の粒径加積曲線を図-5 に、

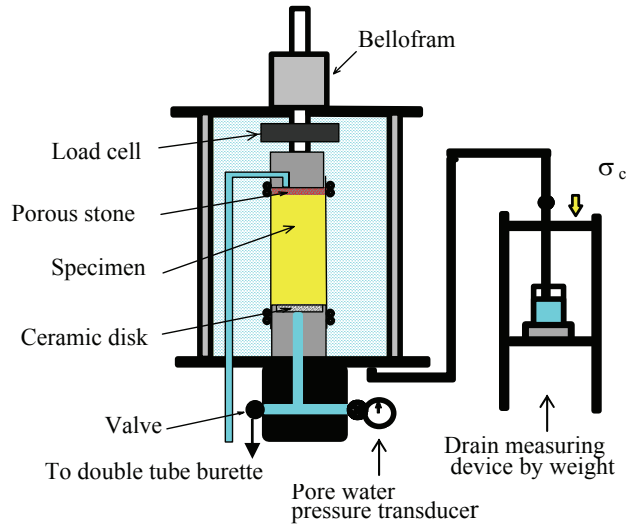


図-6 三軸セルを用いた実験装置の概要

物理的性質を表-1 に示す。

(2) 実験装置

試験には図-6 に示す不飽和土用三軸セルを用いた。ペデスタル部には、ポラスストーンの代わりに空気侵入値 AEV=500kPa のセラミックディスクが埋め込まれている。実験中はセラミックディスクに通じた排水経路端部に取り付けた間隙水圧計により、セラミックディスクを通じて土中の間隙水圧を測定した。供試体のサクシヨンの大きさは、測定された負の間隙水圧の大きさと等しいものとした。

セルに通じる排水経路の先端部分に電子天秤式の排水量測定器を接続して、セル内部への吸排水量を測定した。セル圧の載荷は、排水量測定器内に所定の空気圧を与えることにより行った。不飽和カオリン供試体を用いた試験時には、測定されたセルへの吸排水量に対して、セル内部へのピストン貫入量および以下の 3.(2)b)項で述べるセルの内体積変化量の補正を行って、供試体全体の体積変化を求めた。

ピストンは載荷キャップと剛結されており、供試体の軸変位はピストンを通じてセル外部でひずみゲージ式の変位計により測定した。荷重計はセル内部に設置されているため、せん断時のピストン貫入に伴う摩擦力の影響は無視できるものとした。

なお、飽和供試体を用いて吸水過程(後掲図-9 参照)を行う場合は、セル組み立て時に載荷キャップ内の排水経路をあらかじめ脱気水で満たした状態で二重管ビュレットを連結して設置した。そして、圧密過程はこの排水経路を用いて排水を行った。なお、吸水過程を行う場合は供試体上端部より排水経路を通じて脱気水を供給した。そして、せん断過程では、載荷キャップ内の排水経路のバルブを閉じて、非排

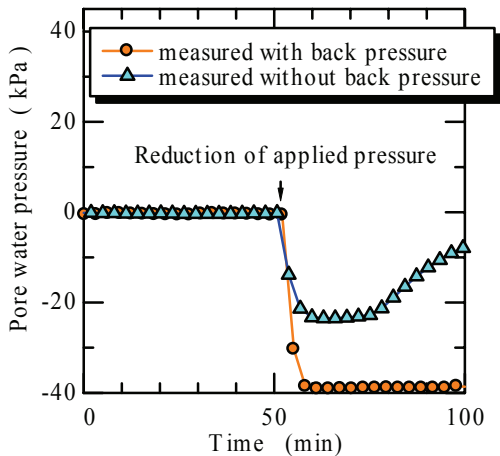


図-7 除荷前後の間隙水圧変化の比較

水試験を行った。また、不飽和供試体を用いて吸水過程(後掲図-10 参照)を行う場合には、飽和供試体と同様、脱気水で満たした状態で二重管ビュレットを連結して設置した。そして、圧縮過程では、二重管ビュレットのバルブを閉じた状態で、セラミックディスクを通じて排水を行った。吸水過程では、セラミックディスク側のバルブを閉じて、二重管ビュレット側から吸水を行い、せん断過程では載荷キャップ内の排水経路側のバルブを閉じて、非排水試験を行った。

a) 負の間隙水圧測定のための背圧荷荷について

本試験では、117.6kPa までの等方圧密過程が終了した後、載荷圧力を 19.6kPa まで減少する除荷過程を行った(後掲図-9 参照)。その際に間隙水圧経路内に発生する気泡の影響を小さくして、より精度の高い負の間隙水圧の測定を可能にするため、除荷前に 50kPa の空気圧を、セル圧および載荷キャップ内の排水経路に連結した二重管ビュレットに背圧として与えた。図-7 は背圧を載荷した場合と載荷していない場合において、除荷前後の間隙水圧を測定比較したものである。背圧を載荷していない場合は、水圧経路内の気泡の発生の影響により、測定された負圧が大きくなっていることがわかる。この結果から、背圧を載荷することにより、除荷時に発生する負の間隙水圧の測定精度をより高めることができたものと判断される。

b) 等方圧縮過程における不飽和供試体の体積圧縮量の測定方法

以下の 3.(4)節で述べるように不飽和状態のカオリン供試体を用いて等方圧縮過程を行う場合、セル圧の増加により供試体内に存在する間隙空気の体積が圧縮する。このため、せん断前の不飽和供試体の体積を正確に求めるには、等方圧縮過程での供試体全体の圧縮量を排水量とは別の何らかの方法で測定す

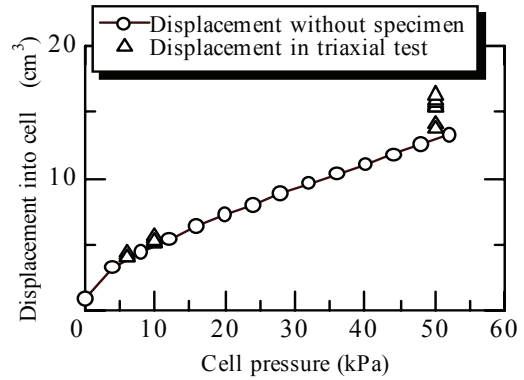


図-8 セル圧とセル内への流入量関係

る必要がある。通常の不飽和土の三軸圧縮試験では、このために外セルと内セルを有する二重セル方式⁵⁾が用いられることが多い。しかし、本研究では図-6 に示した三軸セル(外セル)のみを用いている。そして、等方圧縮過程でのセル圧の変化に伴いセル内体積が変化する。このため、以下の方法により等方圧縮過程での不飽和供試体全体の圧縮量を求めた。図-8 中の○記号のプロットは、供試体がない状態でのセル圧の大きさとその時のセルへの流入水量の関係を示している。この流入水量は、セルの膨張量と残留空気の圧縮量等に相当すると考えられる。また、図-8 中の△記号のプロットは、不飽和カオリン供試体を設置して行ったせん断過程の一例における、セル圧を増加した載荷した場合のセルへの流入水量を示している。セル圧の増加による供試体の体積圧縮量は、両流入水量の差で与えられるものと考えられる。本研究では、不飽和供試体を用いた場合には、この量を測定して等方圧縮過程での供試体全体の圧縮量とした。

(3) 実験方法

セル底盤内部の間隙水圧計に至るまでの排水経路を脱気水で満たし、セラミックディスクを取り付けたペDESTALを設置した後、加圧方式の飽和方法¹⁹⁾によりセラミックディスクを飽和した。なお、セラミックディスクおよび間隙水圧計に続く排水経路の飽和状態の確認は、供試体設置前にセラミックディスク表面をティッシュペーパーで拭き、速やかに約 30kPa の負圧が発生するのを確かめることにより行った⁵⁾。

供試体をペDESTALに設置して厚さ 0.2mm のメンブレンを被せ、載荷キャップと O リングでシールした状態で、供試体の初期サクシヨンの測定を行った。初期サクシヨン測定後にセルを組み立て、セル内部に脱気水を満たした。セルからの排水量を測定するための電子天秤に通じる排水経路を、気泡を巻き込

まないように注意しながら接続した。

等方圧密過程はセル圧が 117.6kPa となるまで段階的に行った。あらかじめ脱気水で満たされた供試体上面に通じる排水経路から圧密時の排水を行った。等方圧密終了後に排水経路のコックを閉じ状態で拘束圧の除荷を行うことにより、供試体内に生じる負圧を測定した。吸水過程を行う場合にはその後、コックを開き供試体への吸水を行った。等方圧の載荷過程や除荷過程における供試体からの吸排水量は、二重管ビュレットに接続した電子天秤式排水量測定装置（図-6 中の Drain measuring device by weight）によって測定した。なお、不飽和供試体を用いて吸水過程を行わない場合は、セル組み立て時から供試体上面に通じる排水経路は水のない状態で大気圧に開放している。

せん断中は、セル水の吸排水量を測定し、それに対してピストン貫入体積を補正することにより、せん断過程での供試体の体積変化量を求めた。実験中の各試験データの測定は、データロガーを用いて自動計測した。なお、せん断時のひずみ速度は 0.4%/分とした。このひずみ速度は、過去に著者の一人が行った締固めた不飽和シルト質土の一軸圧縮試験の試験結果²⁰⁾（せん断ひずみ速度 0.2%/分）と今回行った不飽和カオリン供試体の試験結果が対応するように、そのひずみ速度を参考にして決定した。カオリン試料に対しては後掲図-15 に示すように、今回のひずみ速度により得られたせん断強度（ピーク強度）は、過去に行われたひずみ速度 0.07%/分の三軸圧縮せん断試験結果と対応していることがわかる。不かく乱沖積粘土試料に対しては、「土の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験方法」および「土の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法」に規定されているひずみ速度の目安²¹⁾である 1%/分および 0.05%/分の中間的なひずみ速度となっている。

(4) 実験条件

3.(1)節で述べた手順により作製した飽和カオリン供試体、不飽和カオリン供試体および不かく乱沖積粘土供試体の3種類の供試体を用いて、以下に述べる実験を行った。

図-9は、飽和カオリン供試体および不かく乱沖積粘土供試体を用いた場合の実験手順のフローチャートを示している。試料をトリミング後、セル内に設置した。そして、非排水条件で側圧 $\sigma_3=19.6\text{kPa}$ を載荷した状態で、負の間隙水圧および供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。この試験を非圧密試験（Unconsolidation）と呼ぶ。セル内に設置した試料を $\sigma_c=60\text{kPa}$ および 117.6kPa の圧密圧力

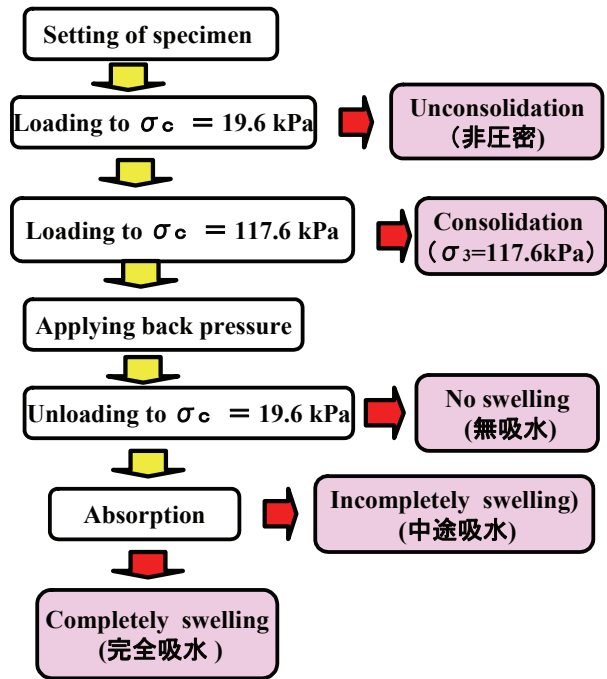


図-9 実験手順フローチャートと試験の種類（飽和カオリンおよび不かく乱沖積粘土供試体の場合）

で段階的に圧密した。そして、非排水条件で側圧 $\sigma_3=117.6\text{kPa}$ を載荷した状態で、負の間隙水圧および供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。この試験を $\sigma_3=117.6\text{kPa}$ 試験（Consolidation）と呼ぶ。セル内に設置した試料を $\sigma_c=117.6\text{kPa}$ の圧密圧力まで段階的に圧密した後、50kPaの背圧を加えた。その後、非排水状態で $\sigma_c=19.6\text{kPa}$ の圧密圧力まで除荷を行った。そして、負の間隙水圧および供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。この試験を無吸水試験（No swelling）と呼ぶ。無吸水試験と同様に非排水状態で除荷した後、吸水経路を開いて吸水過程を実施した。この時、供試体への吸水量の経時変化を測定し、ある飽和度に達した時点で吸水を止めた。そして、非排水条件で $\sigma_3=19.6\text{kPa}$ を載荷した状態で、負の間隙水圧および供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。この試験を中途吸水試験（Incompletely swelling）と呼ぶ。また、吸水過程を継続して、吸水量の経時変化が落ち着いた時点で負圧が消散したのを確認して吸水を止めた。そして、同様にせん断過程を行った。負の間隙水圧が消散して吸水過程が終了したと判断されるので、この試験を完全吸水試験（Completely swelling）と呼ぶ。

図-10は、不飽和カオリン供試体を用いた場合の実験手順のフローチャートを示している。供試体を設置後、圧密圧力 $\sigma_c=19.6\text{kPa}$ を載荷して圧縮過程を行った。そして、排気非排水条件で側圧 $\sigma_3=$

19.6kPaを載荷した状態で、サクシオンおよび供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。これらの試験は $S_r=53\%, 63\%$ として示されている。また、別の実験として、等方圧縮後に吸水過程を実施した。この吸水過程を途中で終えたものが、 $S_r=53\% \rightarrow 66\%$ として示されている。また、吸水挙動がほとんど平衡となるまで行ったものが、 $S_r=53\% \rightarrow 80\%$ および $S_r=62\% \rightarrow 78\%$ として示されている。これらの供試体は

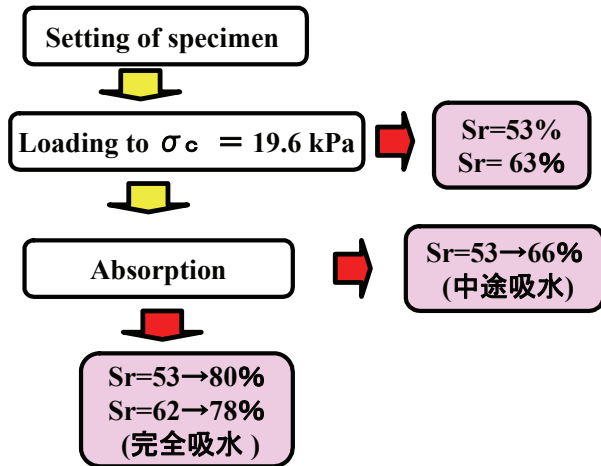


図-10 実験手順フローチャートと試験の種類 (不飽和カオリン供試体の場合)

その後、排気非排水条件で側圧 $\sigma_3=19.6\text{kPa}$ を載荷した状態で、サクシオンおよび供試体体積変化を測定しながらせん断過程を行った。

表-2は実施した試験と、初期状態およびせん断過程前の供試体の諸元を示している。ここで、等方圧縮過程の $\sigma_c=19.6\text{kPa}$ は、地表面下約1mでの有効土かぶり圧を目安とした。また、等方圧縮過程での圧密応力 $\sigma_e=117.6\text{kPa}$ は、沖積粘土試料の採取深度における有効土かぶり圧を目安とした。また、表中では、不かく乱沖積粘土供試体の初期飽和度を100%と表示している。しかし、実際には、供試体重量、含水比および体積から計算された飽和度は100%をわずかに超えていた。

4. 試験結果および考察

(1) 飽和カオリン供試体を用いた実験結果

図-11 は飽和カオリン供試体の完全吸水試験における間隙比、含水比およびサクシオンの経時変化を示している。この図から、間隙比、含水比およびサクシオンともに吸水過程開始から 40 分程度で平衡状態となっていることがわかる。

図-12 は、吸水過程に測定された負の間隙水圧

表-2 試験条件と供試体諸元

Sample	Test name	Initial state		Maxium isotropic compression stress (kPa)	Lateral stress in shearing process (kPa)	State before shearing process		
		Void raio	Degree of saturation (%)			Void ratio	Degree of saturation (%)	Suction (kPa)
Saturated kaoline	$\sigma_3=117.6\text{kPa}$	0.900	89	117.6	117.6	0.873	88	0
	Completely swelling	0.901	90	117.6	19.6	0.875	88	0
	Incompletely swelling	0.904	88	117.6	19.6	0.872	88	41
	No swelling	0.902	90	117.6	19.6	0.874	88	72
	Unconsolidation	0.904	88	19.6	19.6	0.881	88	0
Unsaturated kaoline	$S_r=53\%$	0.849	53	19.6	19.6	0.849	53	49
	$S_r=53\% \rightarrow 66\%$	0.837	53	19.6	19.6	0.847	66	5
	$S_r=53\% \rightarrow 80\%$	0.871	53	19.6	19.6	0.969	80	0
	$S_r=63\%$	0.912	63	19.6	19.6	0.912	63	44
	$S_r=62\% \rightarrow 78\%$	0.918	62	19.6	19.6	0.931	78	5
Alluvial clay	Completely swelling	1.345	100	117.6	19.6	1.360	100	0
	Incompletely swelling	1.341	100	117.6	19.6	1.334	100	36
	No swelling	1.331	100	117.6	19.6	1.310	100	54
	Unconsolidation	1.345	100	19.6	19.6	1.345	100	0

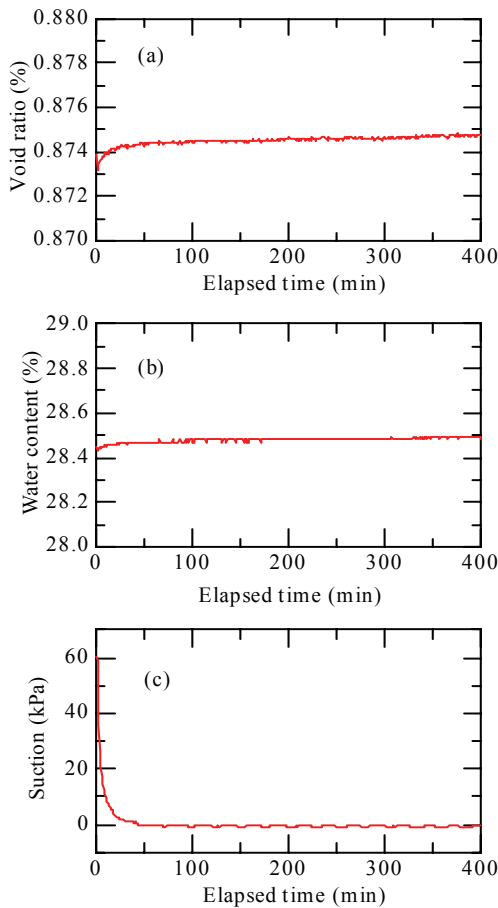


図-11 飽和カオリン供試体を用いた完全吸水試験の吸水過程における間隙比，含水比，サクシヨンの経時変化

と飽和度の関係を水分特性曲線と比較したものである。図中の実線が吸水過程中に測定された負の間隙水圧（サクシヨン）～飽和度関係であり、●記号のプロットは過去に行われた、同じ試料の予圧密供試体により得られた排水曲線²²⁾を示している。この図から、吸水過程での挙動が供試体の空気侵入値（約 250kPa）以下の大きさのサクシヨンの範囲で生じていることがわかる。

図-13(a)(b)はそれぞれ、飽和カオリン供試体のせん断過程におけるせん断応力～軸ひずみ関係、および間隙水圧～軸ひずみ関係を示している。せん断応力～軸ひずみ関係において軸ひずみが約 5%付近までしかデータが存在しないのは、その付近で急激にせん断応力が低下して、供試体が破壊したためである。

図-13(a)のせん断応力～軸ひずみ関係では、無吸水試験 (No swelling) と $\sigma_3 = 117.6\text{kPa}$ 試験 (Consolidation) では、最大せん断応力の差は僅かしか見られない。このことは、無吸水試験における非排水条件における除荷が、土の骨格構造にはほとんど影響を与えなかったことを意味している。一方、

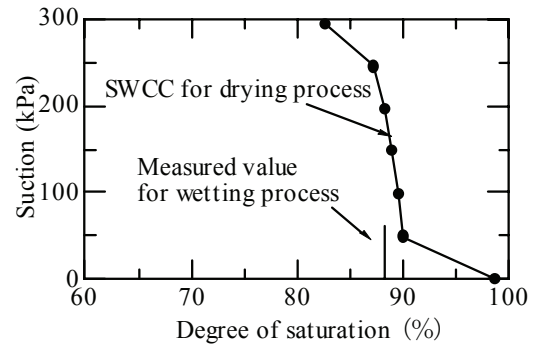


図-12 飽和カオリン供試体を用いた完全吸水試験の吸水過程での負の間隙水圧（サクシヨン）～飽和度関係と水分特性曲線との比較

中途吸水試験 (Incompletely swelling) の場合はわずかに低い低い最大せん断応力を示している。また、完全吸水試験 (Completely swelling) の場合、吸水によるサクシヨン消失の影響を受けて低い最大せん断応力を示している。非圧密試験 (Unconsolidation) とそれ以外の供試体と比較すると、最大せん断応力の大きさが大きく異なっているのがわかる。その原因としては、等方圧密過程の影響が考えられる。

図-13(b)の間隙水圧～軸ひずみ関係では、非圧密試験と $\sigma_3 = 117.6\text{kPa}$ 試験は圧密過程の影響により傾向が異なっている。供試体を作製したブロックサンプルが上載圧 196kPa で作製されたことを考慮すれば、静止土圧係数 $K_0 \approx 0.5$ を仮定すれば先行圧密応力は約 100kPa と考えられる。このため、非圧密試験の場合の方が、 $\sigma_3 = 117.6\text{kPa}$ 試験よりもより過圧密な状態にあり、間隙水圧～軸ひずみ関係もこれに対応しているものと考えられる。一方、中途圧密試験と無吸水試験は、間隙水圧の初期値に違いを生じている。これは、無吸水試験における除荷過程の影響である。しかし、せん断中の挙動はほぼ同じ傾向を示していると考えられる。無吸水、中途吸水、完全吸水の 3 種類の試験を比較すると、吸水過程における吸水量の違いによりせん断初期の間隙水圧の大きさが異なるにも関わらず、せん断がある程度進むと、間隙水圧～軸ひずみ関係は同じ傾向を示しているのが特徴的である。

図-14 は飽和カオリン供試体を用いた試験でのせん断過程における有効応力経路を示している。無吸水試験の応力経路は図中の $M = 1.64$ の直線に沿った経路を示している。また、 $\sigma_3 = 117.6\text{kPa}$ 試験の応力経路は、せん断開始とともに応力経路がほぼ垂直に立ち上がって図中の $M = 1.64$ の直線達した後、直線に沿った経路を示している。このような傾向には、間隙水圧が消散した状態での有効拘束圧とサクシヨンによる有効拘束圧の大きさが同じであることが影

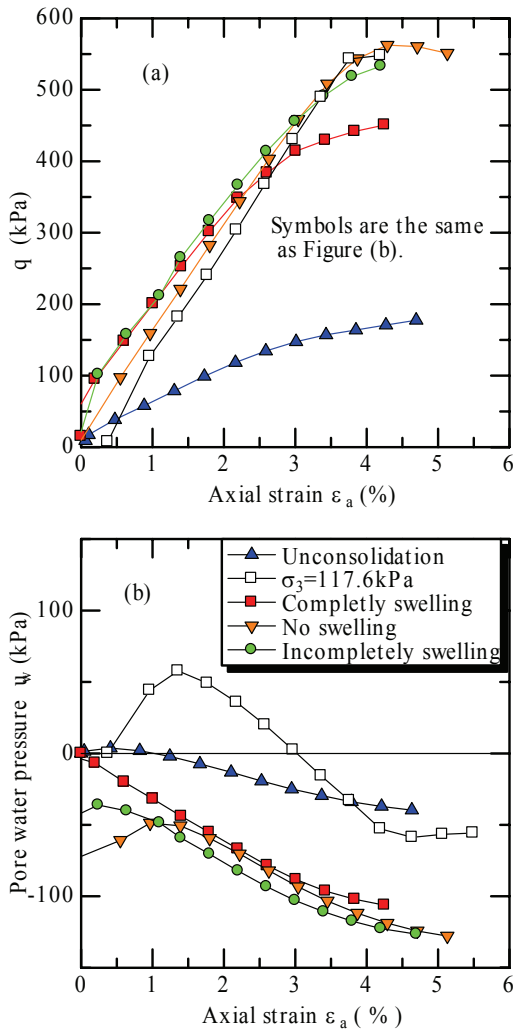


図-13 飽和カオリン供試体のせん断過程におけるせん断応力、間隙水圧～軸ひずみ関係

響しているものと考えられる。中途吸水および完全吸水試験では、吸水により生じたサクシヨンの低下のため、せん断初期の有効拘束圧が減少している。しかし、せん断が進むと、前述の2つの試験と同じ直線状に漸近していく傾向が見られる。図中の直線は、傾き $M=1.64$ を持つ漸近線を示している。なお、非圧密試験の有効応力経路は、この漸近線よりわずかに上側を通る傾向を示している。

図-15 は、過去に同じ試料を用いて行われた三軸圧縮せん断試験²²⁾における破壊応力（最大せん断応力）状態と図-14中の漸近線 ($M=1.64$) を比較したものである。図中の矢印をつけた△記号の結果は漸近線から外れる傾向を示している。これらのデータについては、正規化した応力比 (q/p) ～軸ひずみ関係の傾向が漸近線上に存在するデータとは異なっていた。このような傾向を示す理由としては、矢印をつけた△記号のデータに関しては、トリミング時の乱れ等の影響が現れたものと推察される。これら

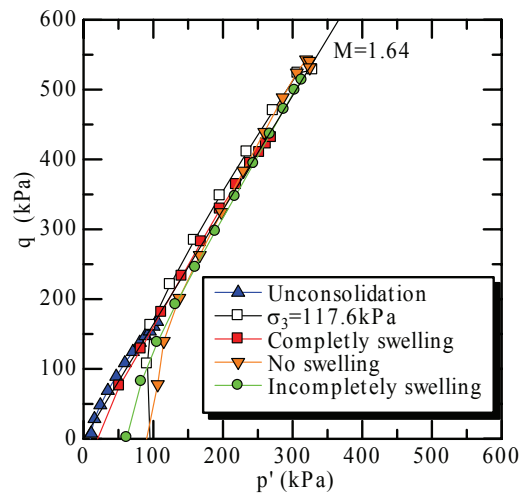


図-14 飽和カオリン供試体を用いた試験における有効応力経路

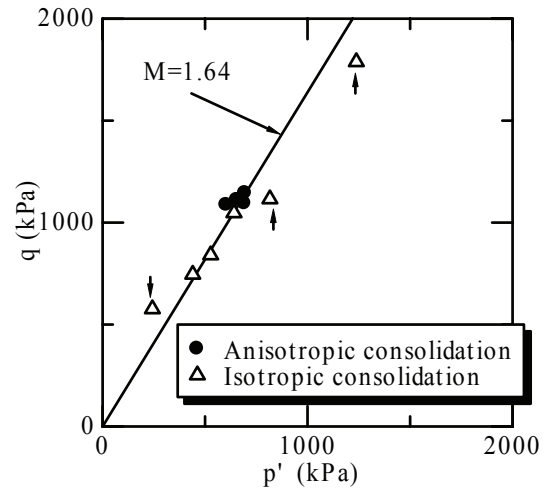


図-15 飽和カオリン供試体を用いた三軸圧縮試験結果と漸近線との比較

のデータを除いた、漸近線上に付近の△記号のデータ、および●記号で示される異方圧密後の三軸圧縮せん断試験データは、漸近線付近に分布している。この結果は、今回の一軸圧縮試験結果による漸近線が三軸圧縮せん断試験で得られる破壊線に対応することを示すものと考えられる。図-14 および図-15の結果を合わせて判断すると、高飽和度の不飽和土に対する試験において、有効応力経路がせん断の進行とともに破壊線上に達した後に破壊線に沿って移動する傾向にあることを意味している。このような傾向は、図-16に示す Toll & Ong²³⁾による三軸圧縮試験における結果や、Shimizu & Tabuchi²⁴⁾によるサクシヨンを測定した一軸圧縮試験結果においても観察されている。

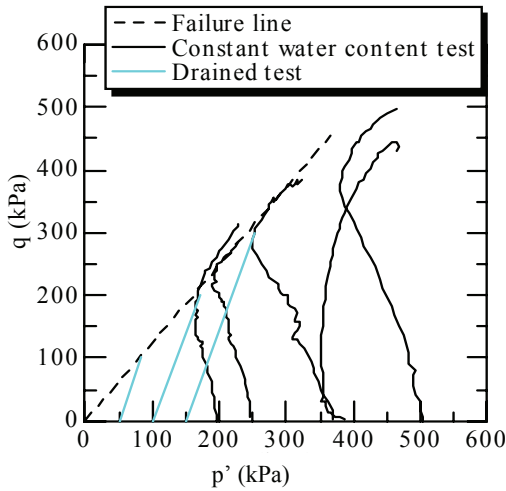


図-16 高飽和度の不飽和土に対する三軸試験試験における有効応力経路¹⁷⁾

(2) 不飽和化したカオリン供試体を用いた実験結果

図-17 は吸水過程を行った供試体における飽和度、間隙比および含水比の経時変化を示している。 $S_r=53\% \rightarrow 80\%$ 供試体、 $S_r=62\% \rightarrow 78\%$ 供試体においては、吸水過程開始直後、急激に供試体内への吸水が生じ、飽和度および含水比が短時間に増加している。その後、飽和度および含水比の増加は緩やかとなり、測定終了付近では平衡状態に至っていると判断される。 $S_r=53\% \rightarrow 66\%$ 供試体の場合は、これらとは傾向が異なり、吸水速度がかなり遅くなっている。この理由は不明であるが、理由としては、実験開始時のセラミックの状態の違い等が影響したものと推測される。間隙比の挙動は、吸水量と対応した形で増加を示している。

図-18(a)、(b)はそれぞれ、せん断過程におけるせん断応力、体積ひずみ～ひずみ関係および間隙水圧～軸ひずみ関係をそれぞれ示している。すべての供試体のデータが、軸ひずみ 4～5%までしか表示されていないのは、前項で述べた飽和カオリン供試体の場合と同様に、供試体が急激に破壊を生じたためである。吸水過程を行っていない $S_r=53\%$ 供試体と $S_r=63\%$ 供試体を比較すると、 $S_r=53\%$ 供試体では、せん断応力～軸ひずみ関係においてピーク挙動が見られるのに対して、 $S_r=63\%$ 供試体ではせん断応力が増加を続けて破壊に至っている。また、この2つの供試体は(b)図に示されているように間隙水圧の変化傾向がほぼ同じである。このようにせん断応力～軸ひずみ関係の傾向が大きく異なっているのは、 $S_r=53\%$ 供試体のほうが飽和度が低く、メニスカス水の影響が大きく現れたためと考えられる。メニスカス水は粒子間付着力をもたらす。この粒子間付着力が増加すると、せん断応力～軸ひずみ関係がより脆

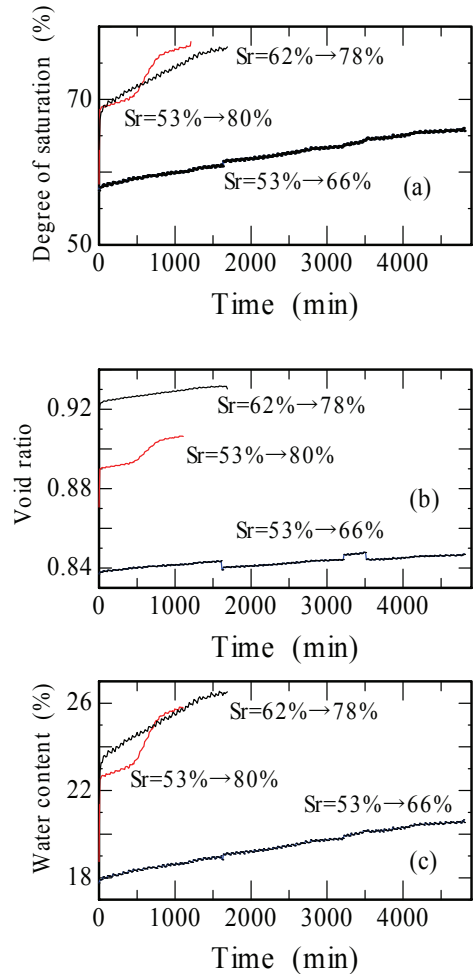


図-17 不飽和カオリン供試体を用いた試験の吸水過程における飽和度、間隙比、含水比の経時変化

性的な傾向を示すことは、粒子間付着力の大きさを自由に設定した個別要素法による二次元粒状材料の二軸圧縮試験における結果²⁵⁾においても確認されている。 $S_r=53\%$ 供試体に見られる脆性的な挙動は、 $S_r=53 \rightarrow 66\%$ 供試体においては、吸水過程によりメニスカス水の影響が消失したために生じていないものと考えられる。しかし、 $S_r=53 \rightarrow 80\%$ 供試体については、体積圧縮を生じ、正の間隙水圧が発生している。さらに、せん断応力～軸ひずみ関係にピークが見られる。この脆性的な挙動に関しては、せん断前の飽和度の大きさ、および間隙水圧がほぼゼロであることから考えると、メニスカスの影響ではなく、飽和化による剛性の減少等が影響しているものと推測される。

$S_r=63\%$ 供試体と $S_r=62 \rightarrow 78\%$ 供試体を比較すると、 $S_r=62 \rightarrow 78\%$ のせん断前の間隙水圧の値は、吸水過程の影響によりほぼゼロとなっている。体積ひずみ～軸ひずみ関係では、 $S_r=63\%$ 供試体の方がやや圧縮側にひずみが生じていることが分かる。また、

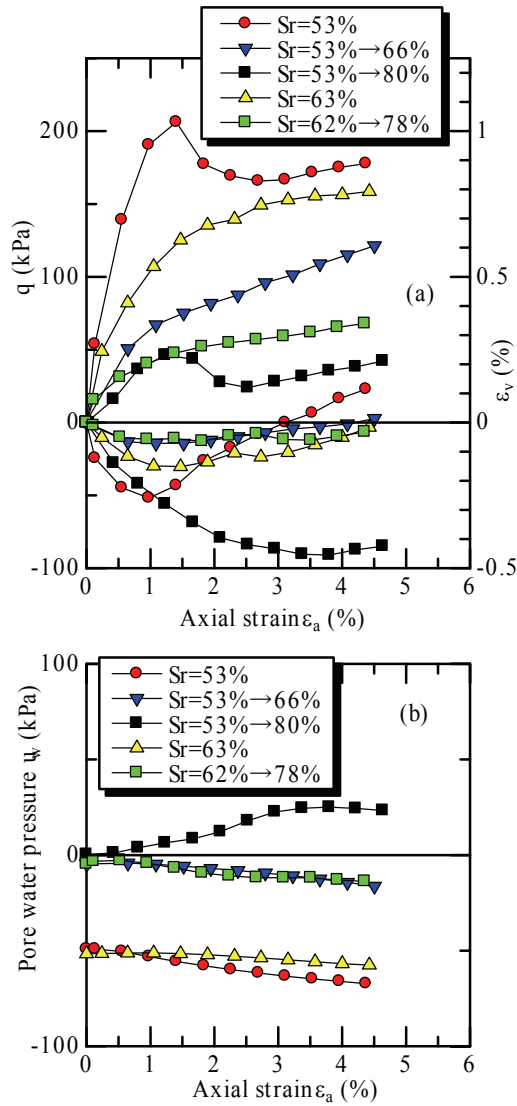


図-18 不飽和カオリン供試体を用いた試験のせん断過程におけるせん断応力、間隙水圧～軸ひずみ関係

せん断応力～軸ひずみ関係は、両者とも単調な増加を示してその傾向はほぼ同じであり、メニスカス水の発達した $S_r=53\%$ 供試体と $S_r=53\rightarrow66\%$ 供試体の場合のような、大きな傾向の変化は見られない。このことも、 $S_r=63\%$ 供試体の間隙水の分布状態が、メニスカス水が発達した状態であったことを示しているものと考えられる。なお、このように推測される供試体内部でのメニスカスの状況の違いは、図-18(b)の間隙水圧挙動にも影響を与えているものと考えられる。

図-19(a), (b)は不飽和カオリン供試体を用いた試験における有効応力経路を、それぞれ横軸に(a) $p - u_w$, (b) $p + p_s$ を取って示したものである。なお、3.(4)節で述べたように、せん断過程では排気非排水条件であるので、 $p_{net} = p$ となる。図-19(a)の図中の実線は、 $S_r=53\rightarrow66\%$ 供試体を除く供試体の残留

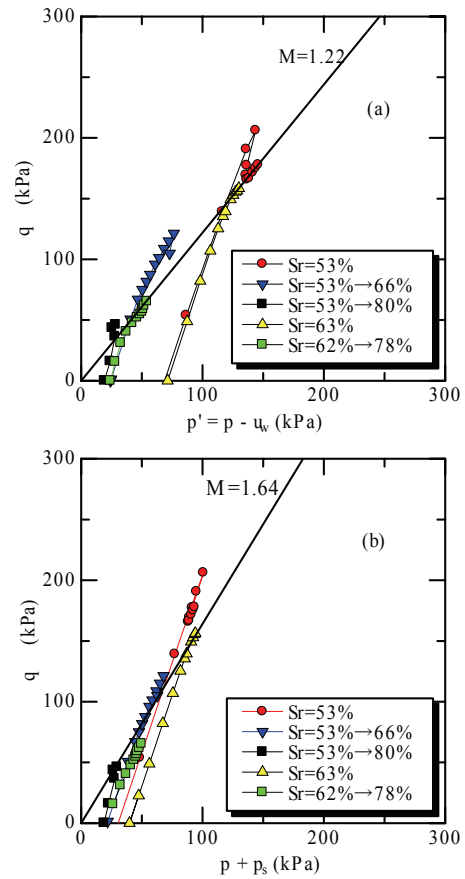


図-19 不飽和カオリン供試体を用いた試験における有効応力経路

やピークの応力状態の応力点を通る、傾き $M=1.22$ の直線を示している。また、図-19(b)の図中の実線は、図-15に示した飽和カオリン試料の破壊線と同じ、傾き $M=1.64$ の直線を示している。図-19(a), (b)を比較すると、 $S_r=53\%$ 供試体の残留応力状態および他の供試体のピーク応力状態は、(b)図の方がより実線付近に分布する傾向を示していることがわかる。この結果は、不飽和土の強度に対するサクシオン応力の影響、およびサクシオン応力を考慮した強度の整理方法の有効性を示しているものと考えられる。

図-14に示した飽和カオリン供試体の結果および図-19に示した不飽和カオリン供試体の結果を合わせて考察すると、不飽和状態となっても飽和度が高い高い状態で間隙中の空気が封入されるような、メニスカスの発達しない場合は、破壊応力状態は飽和土の破壊線上を移動した後に破壊に達していることがわかる。また、飽和度が低く土粒子接点でのメニスカスが発達した不飽和状態の場合は、破壊線を超えてピーク強度に達した後、破壊線まで応力状態が戻っているものと考えられる。このような挙動の違いは、水のメニスカスにより生じる粒子間付着力の

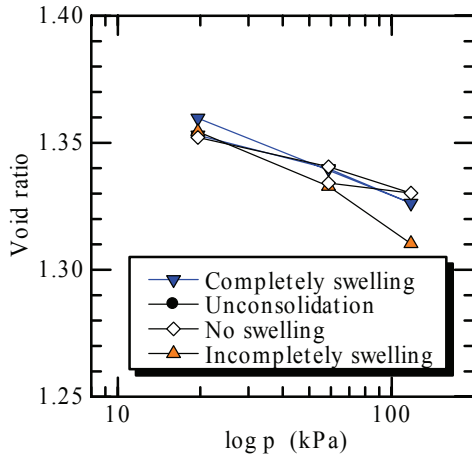


図-20 不かく乱沖積供試体の圧縮曲線

影響によるものであり、不飽和土内の間隙水分布の影響を示すものである。また、この場合の水のメニスカスによる粒子間付着力は粒子のわずかな移動によりメニスカスが消失することも考えられ²⁶⁾、いわば、弱い、壊れやすい粒子間付着力である。その影響は、次節で示す不かく乱沖積粘土試料の場合のような強い粒子間付着力とは、その与える影響が異なるものと考えられる。

(3) 不かく乱沖積粘土供試体を用いた実験結果

図-20 は不かく乱沖積粘土供試体の等方圧密過程における圧縮曲線を示している。最大圧密応力 117.6kPa の応力条件下においては、供試体は正規圧密状態にあるものと考えられる。

図-21 (a), (b), (c) はそれぞれ、吸水過程の挙動の例として、完全吸水供試体の吸水過程における間隙比、含水比および間隙水圧の経時変化を示している。圧密応力 117.6kPa から 19.6kPa までの除荷により、吸水過程前に約 60kPa の負の間隙水圧が供試体内に発生していることがわかる。この発生した負の間隙水圧の大きさが小さいのは、供試体の飽和度が 80%程度と低いためであると考えられる。この間隙水圧は、吸水開始が始まると経過時間 500 分程度まで急激に減少している。以後、間隙水圧は緩やかに減少を続け、吸水過程終了付近にはほぼゼロとなっていることがわかる。この吸水過程中、間隙比、含水比ともに、間隙水圧の減少割合の大きい経過時間 500 分程度までは変化量は大きく、以後の変化量は小さくなっている。吸水過程開始から経過時間 500 分付近までの含水比変化量は 0.8%程度で、吸水過程終了時まででも 1.2%程度である。この程度の含水比変化により、間隙水圧が消失していることになる。

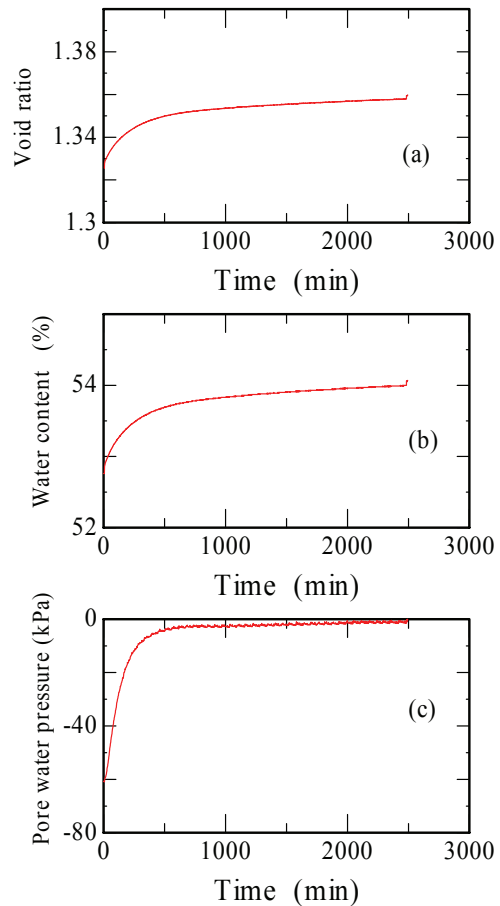


図-21 不かく乱沖積粘土供試体を用いた完全吸水試験の吸水過程での間隙比、含水比、間隙水圧の経時変化

図-22 (a), (b) は、せん断過程におけるせん断応力、間隙水圧～軸ひずみ関係を示している。(b)図の間隙水圧の挙動をみると、非圧密供試体 (Unconsolidation) では初期に間隙水圧は生じておらず、せん断の進行とともに正の間隙水圧が生じた後に減少してゆき、軸ひずみ 3%を越えたあたりから、負の間隙水圧が発生して 15kPa 程度に落ち着く傾向を示している。無吸水供試体 (No swelling) では約 52kPa の負の間隙水圧が発生し、せん断の進行とともに負の間隙水圧が減少している。また、中途吸水供試体 (Incompletely swelling) では初期に 37kPa 程度の負の間隙水圧が発生し、完全吸水供試体 (Completely swelling) では初期の間隙水圧はゼロとなっている。両者とも、せん断の進行とともに負の間隙水圧が減少して正の間隙水圧になった後、正の間隙水圧が減少する方向に変化している。さらに、無吸水、中途吸水、完全吸水の各供試体は、軸ひずみ 3%を越えたあたりから非圧密供試体と同じ傾向を示していることがわかる。(a)図のせん断応力～軸ひずみ関係では、無吸水供試体が負の間隙水圧の影響により、比較的高いせん断強度を示している。ま

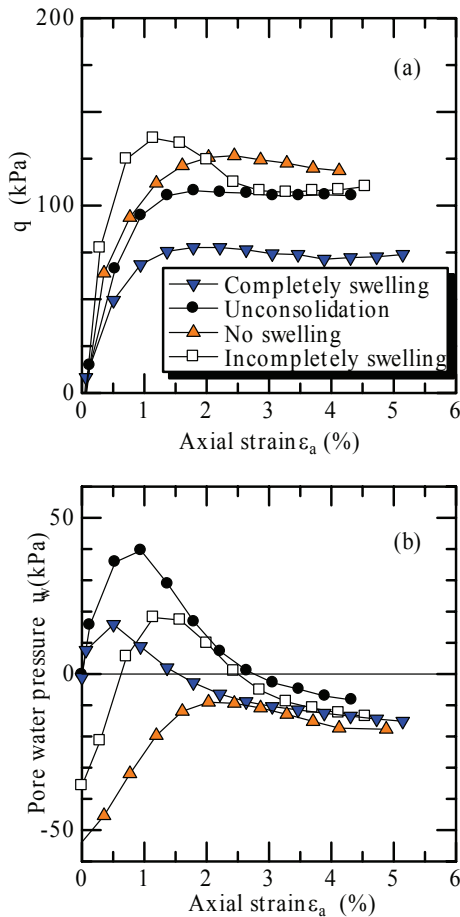


図-22 不かく乱沖積粘土供試体のせん断過程におけるせん断応力，間隙水圧～軸ひずみ関係

た，中途吸水供試体は無吸水供試体とほぼ同じ大きさのせん断強度を示した後に，間隙水圧が減少し始める軸ひずみ 1.5%付近よりせん断応力も減少しはじめ，最終的には非圧密供試体とほぼ同じ大きさのせん断応力を示している．完全吸水供試体は，他の供試体よりもかなり低いせん断強度を示していることがわかる．なお，図-22(a)において，中途吸水供試体の挙動が他に比べて脆性的に見えるのは，以下のように考えられる．すなわち，無吸水供試体に見られる緩やかな軟化挙動が，吸水による負の間隙水圧の消失によって大きな強度低下につながる場合は，完全吸水供試体のような挙動となるが，吸水過程が途中であるため，その移行状態にあるためであると推察される．

図-23 は，せん断過程における有効応力経路を比較したものである．図中の直線は，非圧密，完全吸水および中途吸水供試体の最終応力状態と完全吸水供試体のピーク応力状態から決定した，傾き $M=1.67$ の限界状態線である．なお，この傾き $M=1.67$ は，内部摩擦角 $\phi = \sin^{-1}\{(3M)/(6+M)\}$ とする関係に基づくと， $\phi=40.7$ 度に相当する．

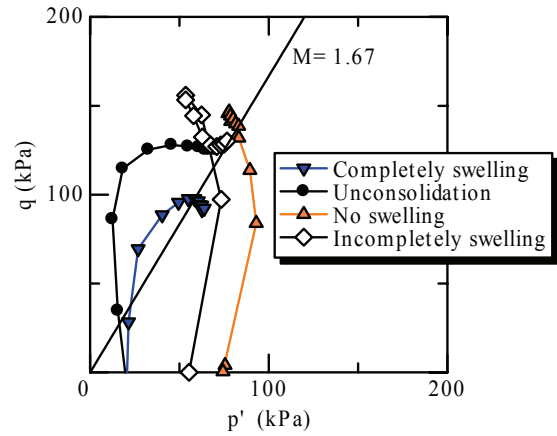


図-23 不かく乱沖積粘土供試体を用いた試験における有効応力経路

非圧密供試体 (Unconsolidation) はせん断開始とともに応力経路が立ち上がり，一定のせん断応力に達した後，そのせん断応力を保ったまま，限界状態線に達していることがわかる．このような挙動には，堆積により粘土内に生成された構造が影響を与えているものと考えられる．一方，無吸水 (No swelling) および中途吸水供試体 (Incompletely swelling) では，せん断初期に有するサクシヨンの影響から，非圧密供試体よりも大きな平均有効主応力の状態から応力経路が立ち上がり，ピークのせん断応力を示した後，せん断応力が減少しながら限界状態線に達している．

非圧密供試体と比較すると，これらの供試体の場合，圧密過程の影響により，試料採取時に保持していた土構造が破壊し，新たにゆるい構造が形成されたが，せん断過程によりその構造は素早く破壊されたものと考えられる．すなわち，非圧密供試体との挙動の差は，構造を形成する土粒子間付着力の強さの差と考えられる．非圧密供試体では，堆積により形成された強い粒子間付着力が作用しているものと考えられる．この供試体の挙動は，無吸水供試体や中途吸水供試体などの，堆積による構造が破壊された後に，短い圧密時間で形成された弱い粒子間付着力を持つ場合とは挙動が異なっているものと考えられる．完全吸水供試体においては，堆積により生成された構造が圧密によってゆるい構造となり，その後の吸水過程によりその構造がほとんど消失した状態になっているものと考えられる．

また，短い圧密時間により形成された弱い粒子間力を有すると考えられる無吸水ならびに中途吸水供試体や，堆積による強い粒子間力を有すると考えられる非圧密供試体の残留状態における応力点が，吸水によりほとんど土構造が消失したと考えられる完

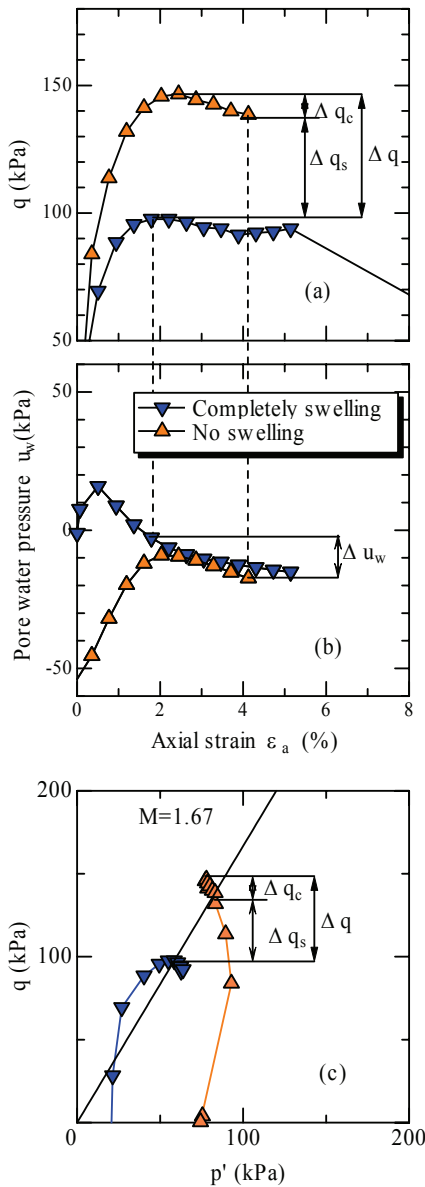


図-24 強度低下量の推定方法の考え方

全吸水供試体のピーク時の応力点とともに、 $p' \sim q$ 面上で一つの直線上に分布する傾向を示している。この結果は、残留状態において粒子間力による構造が消失したことを示しているものと考えられる。

(4) 吸水による強度低下量の推定

図-24 は、不かく乱沖積粘土供試体のせん断過程における、せん断応力、サクシオンおよび有効応力経路を比較したものである。図中の△印は等方圧密後に非排水で除荷を行うことにより発生した負の間隙水圧が拘束圧として作用している無吸水供試体 (No swelling) の、▽印は負の間隙水圧が完全になくなるまで吸水を行った完全吸水供試体 (Completely swelling) の結果をそれぞれ示している。ここで、各供試体間におけるせん断応力の最大値の差を Δq と

呼ぶことにする。 Δq は、本研究における実験結果に基づき、以下のようにして推定することが出来るものと考えられる。

供試体がサクシオンを持つ場合、サクシオンは拘束圧として作用し、せん断強度を増加する。図-14 に示した飽和カオリン供試体の場合、このようなサクシオンの効果が現れて、強度が増加しているものと考えられる。一方、飽和度が低下して不飽和化した場合、供試体内部にはメニスカスが発達する。そのメニスカスにより生じる粒子間付着力の影響により供試体は構造を持つと考えられ、図-19 に示したように、有効応力経路はピーク強度を示した後に破壊強度線に達する。また、不かく乱沖積粘土供試体においては、堆積による場合と圧密過程による場合により構造の強さの違いがあるが、図-23 に示したような結果が得られている。以上の結果から判断して、次のような仮定を考える。すなわち、無吸水供試体の最大せん断応力点と残留強度との差を試料が持つ構造の消失によって起こる強度低下量 Δq_c とし、無吸水のせん断終了時の強度と完全吸水の最大せん断応力点の差を間隙水圧(サクシオン)の消失による強度低下量 Δq_s とすることにより、 Δq は次式で表されるものとする。

$$\Delta q = \Delta q_s + \Delta q_c \tag{3}$$

ただし、 Δq_s は飽和状態に対しては、

$$\Delta q_s = M \Delta p' = M \left(\frac{\Delta \sigma_1}{3} - \Delta u_w \right) \tag{4}$$

また、不飽和状態のときは、

$$\Delta q_s = M \Delta (p + p_s) = M \left(\frac{\Delta \sigma_1}{3} + \Delta p_s \right) \tag{5}$$

以上から、式(3)に基づいて吸水による強度低下量の算定を以下に試みる。

なお、式(3)中の Δq_c は通常、繰り返した飽和試料ではゼロになると考えられる。しかし、図-19 に見られるように、スラリー状態から圧密した飽和試料であっても先行応力を与えることによって過圧密化が生じたり、乾燥することでメニスカスが発達して、粒子間付着力の影響により構造を持つ場合がある。このような場合には、 Δq_c が存在するものと考えられる。その場合は、 Δq_c はせん断応力～軸ひずみ曲線より実測するものとする。

表-3 は、今回の試験結果について吸水による強度低下量の推定を試みた結果である。いずれの供試体も完全吸水供試体に対する強度低下量を算定して

表-3 吸水による強度低下量の推定

	Test name	Δu_w (kPa)	$\Delta\sigma_1/3$ (kPa)	Δq_c (kPa)	Δq_s = Δq measured - Δq_c (kPa)	Δq measured (kPa)	Δq_c + $M(\Delta\sigma_1/3 - \Delta u_w)$ (kPa)	Δp_s (kPa)	Δq_c + $M(\Delta\sigma_1/3 + \Delta p_s)$ (kPa)
Saturated kaoline	Incompletely swelling	-16.7	27.5	0.0	82.4	82.4	72.4	-	-
	No swelling	-12.8	33.5	11.2	100.4	111.6	87.1	-	-
Unsaturated kaoline	Sr=53%	-73.7	43.8	28.5	131.5	160.0	-	28.70	147.5
	Sr=63%	-43.8	30.2	0.0	90.6	90.6	-	12.10	69.4
Alluvial clay	No swelling	-15.5	13.7	8.0	41.0	49.0	56.7	-	-
	Unconsolidation	-5.3	10.7	0.0	32.1	32.1	26.7	-	-

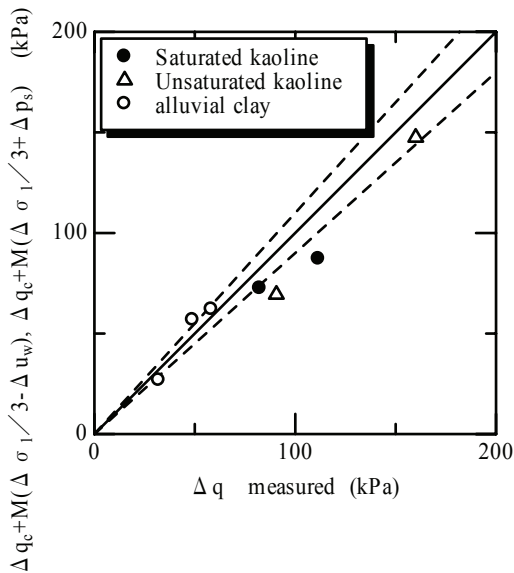


図-25 強度低下量 Δq の実測値と計算値の比較

おり、表中の Δu_w 、 $\Delta\sigma_1/3$ 、 Δq_c ならび $\Delta q_{measured}$ は、実測値をそれぞれ示している。また、 $\Delta q_c + M(\Delta\sigma_1/3 - \Delta u_w)$ ならびに $\Delta q_c + M(\Delta\sigma_1/3 + \Delta p_s)$ は、実測値に基づく式(3)の計算値を示している。図-25は、式(3)を適用して得られた強度低下量の算定値 Δq と、実験結果から直接求めた強度低下量 $\Delta q_{measured}$ を比較したものである。なお、図中の点線は誤差 $\pm 10\%$ を表している。この結果から、式(3)に基づき、吸水による強度低下量の推定が $\pm 10\%$ 程度の精度のもとで可能であることが示されたものと考えられる。

5. 結論

本研究では、吸水過程が不飽和土の強度に与える影響を調べるために、スラリー状態から与圧密したカオリン試料および不かく乱沖積粘土試料を用いて、吸水過程を含めた低拘束圧下における非排水せん断試験を行った。本研究によって得られた結果は、以下のようにまとめられる。

1. サクションを有する飽和カオリン供試体の有効応力経路は、最大せん断応力で示される破壊線に達した後に破壊線に沿って上昇してせん断強度を増加した後に破壊するという傾向を示した。なお、このような傾向は、過去の試験結果と同様であると考えられる。
2. 飽和カオリン供試体は、真空蒸発法により乾燥して飽和度が低下すると、せん断過程での応力～ひずみ関係の傾向が変化して明らかなピーク強度を示した。これは、メニスカス水により生じる粒子間付着力の影響であり、間隙水分布の違いが挙動に影響を与えたものと考えられる。
3. 先行圧密応力を与えて除荷した後、吸水させた不かく乱沖積粘土供試体では、せん断過程で破壊線を越えるピーク強度を示さなかった。この現象は、吸水によって固結成分による構造が崩壊したためであると考えられる。
4. 吸水履歴の異なる供試体のせん断強度を比較検討した結果、吸水によって生じる強度低下量は、固結成分による構造が崩壊することによる強度低下量とサクションの低下による強度低下量に分けて考えることが可能であることが分かった。
5. 不かく乱沖積粘土試料の非圧密供試体の有効応力経路は、無吸水供試体や中途吸水供試体、な

らびに不飽和カオリン供試体と異なる傾向を示した。これは、非圧密供試体には堆積により形成された強い粒子間付着力が作用し、後者の3ケースの場合は、弱い粒子間付着力が作用したためと考えられる。

6. サクションを測定した非排水せん断試験を行うことによって、飽和・不飽和状態にかかわらず、低拘束圧下における吸水による強度低下量を算定できる可能性があることが示された。
7. 残留強度特性は、サクション応力を考慮した平均有効主応力により飽和・不飽和状態にかかわらずユニークに整理される傾向を示した。

謝辞：本論文の作成に関して御助言いただきました神戸大学工学部 渋谷 啓 教授に感謝致します。また実験に御協力いただきました、神戸大学都市安全研究センター 飯塚 敦 教授、ならびに神戸大学工学部 河井克之 助手に感謝致します。

参考文献

- 1) 小橋澄治, 佐々恭二：地すべり・斜面災害を防ぐために, 山海堂, pp.49-55, 1990.
- 2) 例えばJennings, J.E. and Burland, J.B.: Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 3) 例えば福田 護：浸水に伴う土のせん断抵抗の低下と盛土斜面の安定解析, 土木学会論文報告集, Vol.18, No.3, pp.155-168, 1978.
- 4) Hashimoto, T., Nagaya, J., Kishio, T. and Shiotani, T.: Investigation of Strength Degrading due to Swelling of the Ground in Excavation, *Proceeding of the International Conference on Foundation Failures*, pp.393-397, 1997.
- 5) 地盤工学会編:土質試験の方法と解説—第一回改版—, 第7編 3.5不飽和土の三軸圧縮試験, pp.524-541, 2000.
- 6) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識：不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.83-92, 1996.
- 7) Sugii, T. Yamada, K. and Kondou, T. Relationship between soil-water characteristic curve and void ratio, *Proceedings of 3rd International Conference on Unsaturated Soils*, Vol.1, pp.209-214, 2002.
- 8) 東山 勇, 石田朋靖：pFの基本的意味(その2), 土と基礎, Vol.34, No.12, pp.71-76, 1986.
- 9) Kato, S. and Kawai, K.: Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.75-90, 2000.
- 10) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.313-321, 1978.
- 11) Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, p.220, 1993.
- 12) 阿部廣史：不飽和土の力学特性の評価方法に関する実験的研究, 東京大学学位論文, pp. 202-221, 1994.
- 13) Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, M.D. and Clifton, A.W.: Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392, 1996.
- 14) 宇野尚雄, 宮下高昭：浸水による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, Vol.29, No.6, pp.41-48, 1981.
- 15) 同上 12), pp.134-144.
- 16) 大塚 悟, 宮田善郁, 岩部 司：間隙水圧載荷試験による粘性土のせん断破壊機構, 地すべり, Vol.37, No.4, pp.10-17, 2001.
- 17) Orense, R., Farooq, K. and Towhata, I.: Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.15-30, 2004.
- 18) 井上友博, 梅崎健夫, 河村 隆：真空蒸発法で作製した不飽和粘土供試体の圧密・強度特性, 第38回地盤工学研究発表会平成15年度発表講演集, 地盤工学会, 462, pp.923-924, 2003.
- 19) 地盤工学会編:不飽和地盤の挙動と評価, 資料編2.3.1 三軸圧縮試験, pp.206-208, 2004.
- 20) 加藤正司, 吉村優治, 河井克之, 寸田 亘：不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼすサクションの影響, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.201-218, 2001.
- 21) 同上 5), 第7編 3.3等方応力を加えた土の三軸試験, pp.462-500.
- 22) 瀬口均：異方圧密された不飽和粘性土の力学特性, 神戸大学大学院自然科学研究科, 博士前期課程学位論文, 2000.
- 23) Toll, D.G. and Ong, B.H.: Critical-state parameters for an unsaturated residual sandy clay, *Geotechnique*, Vol.53, No.1, pp.93-103, 2003.
- 24) Shimizu, M. and Tabuchi, T.: Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.3, pp.28-39, 1993.
- 25) 加藤正司, 山本修一, 野並 賢：粒子間付着力を取り入れた個別要素法による二軸圧縮試験シミュレーションと不飽和土の三軸圧縮試験の比較, 土木学会応用力学論文集, Vol.2, pp.419-426, 2000.
- 26) 加藤正司, 榊原辰雄, 畑中憲彦：三軸試験時の不飽和砂の変形強度特性に与えるサクションの影響に関

する基礎的研究, 土木学会論文集, No.785/III-70,
pp.93-106, 2005.

(2005. 6. 21 受付)

EFFECT OF SUCTION REDUCTION CAUSED BY WETTING PROCESS ON SHEAR STRENGTH CHARACTERISTICS UNDER LOW CONFINING PRESSURE

Shoji KATO, Takahiro KONDA and Hiroyuki SHINKAI

In this study, triaxial compression test under low confining pressure and undrained state were carried out for saturated and unsaturated kaoline specimens and undisturbed sample, to study the effect of suction reduction caused by wetting process, and effective stress path shear and strength characteristics were examined. From the test results, it was found that the intergranular adhesive force between soil particles affects on the peak strength, and that the residual strengths were arranged uniquely for the effective mean stress taking the suction stress as confining pressure. And we proposed one prediction method for the strength reduction caused by decrease of suction during wetting process.