

## 乱れを受けた飽和粘性土の力学特性

### SHEARING CHARACTERISTICS OF DISTURBED SATURATED CLAY

八木 則 男\*・矢田部 龍一\*\*

By Norio YAGI and Ryuichi YATABE

In order to investigate influence of fabric of clay soil on shearing behaviour, three kinds of samples were prepared which have different fabrics, that is, naturally deposited undisturbed sample, artificially consolidated samples which were remoulded under higher water content and under several water contents lower than the liquid limit. The consolidated undrained triaxial compression tests were carried out for these samples under normally consolidated, over consolidated and cyclically sheared states. The influence of fabrics on shearing behaviour can be found in Fig. 12 and Fig. 13 which show the relationship between the coefficient of pore water pressure  $A_v$  and the parameter  $b$  which is determined on water content-logarithm of consolidation pressure diagram.

#### 1. ま え が き

サンプリングに伴う粘土試料の乱れをはじめとして、砂杭等を含めた杭打ちの際の周辺粘土地盤や動圧密工法が施工された地盤の乱れ、さらに地震も含めて種々の繰り返し荷重が作用した地盤の乱れ等、飽和粘性土が乱される現象は数多くみられる。飽和粘性土の乱れに関する研究はかなり多く行われてきているが、その多くは有効応力の変化という立場から乱れを扱っており、構造の変化から乱れを定量的に扱った研究は少ない。

飽和粘性土の力学特性は含水比と圧密応力それに過圧密比により一義的に決まるといわれている。しかし、自然堆積した粘土地盤からサンプリングした不攪乱試料と、それを液性限界以上の高含水比で練り返し再圧密した試料とでは力学特性が異なることが知られている。したがって、この両者を前記のパラメーターで一義的に決定することはできない。これは試料の初期の構造が異なることが原因していると思われるので、それを評価するパラメーターが必要であろう。ここで、土の構造とは土粒子の幾何学的配列を意味している。もちろん、含水比、

圧密圧力、過圧密比の変化によっても構造の変化は起こっているわけであるが、初期の構造が同じであれば圧密圧力等の変化に伴う構造の変化も含めて力学特性をそれらのパラメーターで一義的に評価できるわけであるから含水比、圧密圧力、過圧密比は基本的なパラメーターとして扱ってよいであろう。

構造の変化を扱ったパラメーターとして、砂質土に対しては粒子の長軸方向の分布<sup>1),2)</sup>、間隙比とその分布および接点数<sup>3),4)</sup>、接平面の単位法線ベクトルの密度関数<sup>5)</sup>等がある。また、粘性土に対しても計測機器の進歩もあってマイクロな観察に基づき種々の構造モデルが提案され、マクロな力学挙動の説明が試みられている<sup>6),7)</sup>。しかし、粘性土はマイクロな挙動が複雑で構造の定量化が難しく、マクロな力学特性を十分表現するまでには至っていないと思われる。そのような現状にあつては、マクロな立場から構造の変化を評価できるパラメーターを考えることは第一近似であっても工学的には有用であろう。そのような見地に立って著者らは、液性限界以上の高含水比で練り返し再圧密した試料と液性限界以下の低含水比で練り返し再圧密した試料という初期に有する構造が異なる試料の力学特性を調べ、破壊時の間隙圧係数を一義的に評価できるパラメーターをすでに提示した<sup>8)</sup>。低含水比で練り返しした試料は構造が最も乱された状態であるの

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科  
(〒790 松山市文京町3)

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

で、粘土の乱れを考える場合には非常に重要であろう。

本報告では、まず不攪乱試料とそれを液性限界以上の高含水比で練り返し再圧密した試料さらに液性限界以下の低含水比で練り返し再圧密した試料という3つの異なる初期構造をもつ試料に対して三軸圧縮試験を行い、それらの力学特性の評価を試み、また提案したパラメーターの妥当性を調べた。次に構造の変化と過圧密の影響を受けていると考えられる非排水状態で練り返し载荷を受けた試料の静的せん断特性を調べ、過圧密、構造の乱れという観点から考察を加えた。また、その結果を用いて飽和粘性土の非排水せん断強度と乱れの間係について考察を行った。

2. 構造の変化に伴う力学特性の変化

(1) 試料, 実験方法

試料には広島県掛の浦のG, L. 18.0 m~18.8 mでサンプリングした海成の不攪乱粘土 (Specimen A) を使用した。試料の物性と粒径加積曲線を Table 1 と Fig. 1 に示す。鋭敏性は30以上である。練り返し载荷の影響を調べるために行った実験に使用した試料 (Specimen B) も併記してある。

実験は不攪乱試料の正規圧密供試体 (UNC) とそれを液性限界以上の高含水比で練り返し再圧密した正規圧密供試体 (NC), さらに液性限界以下の低含水比で練り返し再圧密した正規圧密供試体 (RNC) に対して行っ

Table 1 Physical properties of specimens.

	G <sub>s</sub>	P. L.	L. L.
Specimen A	2.66	33 %	87 %
Specimen B	2.68	27 %	49 %

Table 2 Test conditions.

名称	略称	練り返し時含水比	等方圧密圧力
不攪乱試料	UNC		294, 392, 490 kPa
練り返し再圧密試料	NC	185 %	294, 392, 490 kPa
練り返し再圧密試料	RNC	56.2, 51.5 %	294, 392, 490 kPa

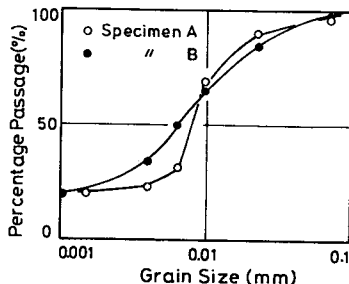


Fig. 1 Grain size distribution curve.

た。RNC 供試体の作成手順は次のようである。スラリー状から圧密した試料を空気を混入させないように注意して薄手のゴムスリーブに密封し、手で完全に練り返した後、三軸供試体を作成した。練り返し時間は試料が十分均一になるよう約20分とした。練り返し前後の含水比の変化はみられなかった。実験方法は側圧一定の圧密非排水三軸圧縮試験で、圧密時間はUNCに対して各段階4日間とし、NC, RNCに対しては2日間とした。供試体の寸法はφ50 mm, h=100 mmで、変位速度はすべて0.03 mm/minである。練り返し時含水比、圧密圧力を Table 2 に示した。実験時にはバックプレッシャー196 kPa を作用させ、間隙係数のB値は0.95以上である。

(2) 実験結果と考察

a)  $w \sim \log \sigma'_m$

せん断時含水比  $w$  と圧密圧力  $\sigma'_m$  の関係を Fig. 2 に示す。UNC は試料の初期含水比が異なっていたので、実験した試料各個に対しての  $w \sim \log \sigma'_m$  関係を示した。また、RNC は練り返し時の含水比の異なる2種類の試料に対して実験したので、おのおのの  $w \sim \log \sigma'_m$  関係を示した。

UNC, NC, RNC のラインを比較すると、従来指摘されているように<sup>9)</sup>同一圧密圧力に対する含水比はUNC, NC, RNC の順に小さく、圧縮指数  $C_c$  もUNC, NC, RNC の順に小さくなっている。

b) 応力~ひずみ~間隙水圧関係

UNC, NC, RNC の圧密圧力  $\sigma'_3 = 392$  kPa での軸差応力 ( $\sigma'_1 - \sigma'_3$ ) と軸ひずみ ( $\epsilon_a$ ) それと間隙水圧 ( $\Delta u$ ) の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 2 をみてわかるようにUNC, NC, RNC は通常の圧密圧力下では含水比、圧密圧力の両者とも等しい試料を作ることは不可能である。したがって、Fig. 3 の試料も含水比が異なり詳しい比較はできないので一般的傾向を述べるにとどめる。

軸差応力と軸ひずみの関係をみると、ピーク強度での

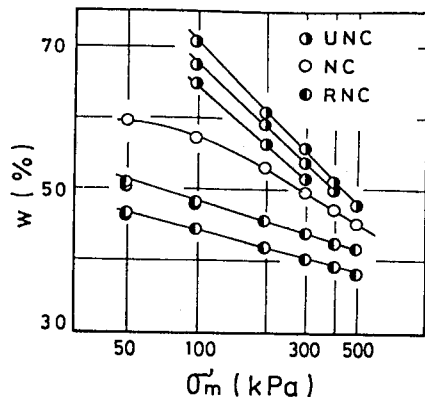


Fig. 2  $w \sim \log \sigma'_m$  diagram.

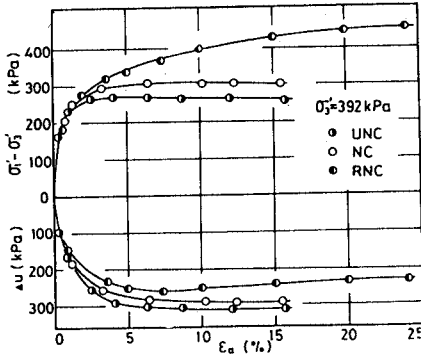


Fig. 3 Relationship between deviator stress, axial strain and pore water pressure.

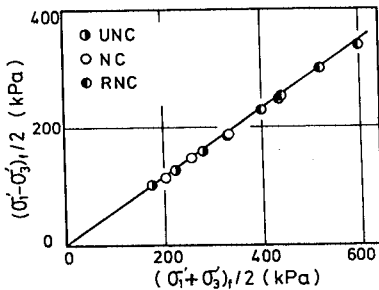


Fig. 4 Failure line terms of effective stress.

軸ひずみはUNCで4%程度、NCで7~8%程度であり、RNCでは20%を越えても軸差応力はわずかであるが増加している。変形係数 ( $E_{50}$ ) は含水比が最も低いにもかかわらずRNCが最小で、次いでNC、UNCの順になっている。また、間隙水圧と軸ひずみの関係を見ると、UNC、NCでは軸ひずみの増大とともに間隙水圧は増加し定常値に達しているのに対し、RNCでは間隙水圧は増加した後、減少に転じている。

c) 見掛けの強度定数

有効応力規準による見掛けの粘着力  $c'$  および見掛けの内部摩擦角  $\phi'$  を求めるために  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_x / 2$  と  $(\sigma'_1 + \sigma'_3)_x / 2$  の関係を Fig. 4 に示す。なお、破壊は軸差応力最大の点で求めたが、RNCでは Fig. 3 に示すように大ひずみで定常状態に達するので、すべて大変形まで試験して求めた。UNC、NC、RNCとも原点を通る同一直線上にほぼ乗っており、構造の変化によって  $\phi'$  の極端な変化はみられないと考えてよい。

d) 破壊時の間隙圧係数

破壊時の間隙圧係数  $A_r$  と圧密圧力  $\sigma'_m$  の関係を Fig. 5 に示す。NCの  $A_r$  は圧密圧力  $\sigma'_m$  に無関係にほぼ一定である。RNCでは、砂の初期間隙比を一定にした試験からも予想されるように、練り返し時含水比が同じであれば  $A_r$  は  $\sigma'_m$  の増大とともに大きくなっており、

また、練り返し時含水比の低いものほど  $A_r$  は小さい。UNCは初期含水比にばらつきがみられるので、 $A_r$  と  $\sigma'_m$  の関係の傾向はわからない。UNC、NC、RNCの  $A_r$  の相互の関係を比べてみると同一圧密圧力ではUNCが最も大きく、次いでNC、RNCの順になっている。

このように、圧密圧力が等しくてもUNC、NC、RNCの  $A_r$  は異なり、またRNCの  $A_r$  は練り返し時含水比の影響も受けている。このUNC、NC、RNCの  $A_r$  を一義的に評価することを試みる。

NC、RNCの  $A_r$  は次のように整理すれば一義的に評価できることを既に示している<sup>8)</sup>。すなわち、正規圧密粘土では圧密圧力に無関係に  $A_r$  は一定となりダイレイタンシーの傾向も同じであるので、含水比と圧密圧力の関係を示す Fig. 2 でNC線(限界状態線)に平行な線上では同様な力学特性を示すのではないかと予想できる。このような考えに基づいて実験結果を整理するために次に示す  $b$  値を用いた。正規圧密粘土の含水比  $w$  と  $\log \sigma'_m$  の関係は直線関係で、 $w = a \log \sigma'_m + b$  となる。この式に平行な直線は  $a$  が同じで、異なる  $b$  の値で表わされる。そこで、 $w \sim \log \sigma'_m$  図上のおおのの点よりNC線に平行線を引き、 $\sigma'_m = 98 \text{ kPa}$  における含水比の値(小数表示)  $b$  を求め、それと  $A_r$  の関係を示すとNC、RNCは直線で示される。また、 $b$  値が同一であれば、ダイレイタンシーの傾向も等しくなる。

今回行った実験結果を前述した  $b$  と  $A_r$  の関係で示したのが Fig. 6 である。UNC、NC、RNCとも直線関係

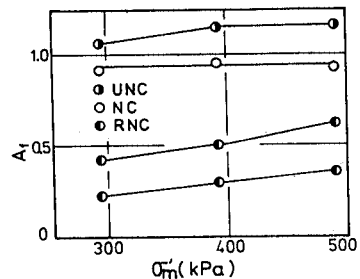


Fig. 5 Relationship between  $\sigma'_m$  and  $A_r$ .

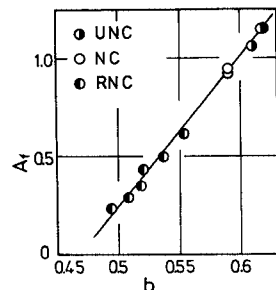


Fig. 6 Relationship between  $b$ -value and  $A_r$ .

Table 3 Test conditions.

略称	略称の意味	繰り返し時含水比	静的せん断時圧密圧力
NC	液性限界以上の含水比で繰り返し、正規圧密状態で静的せん断	140 %	196, 294, 392 kPa
OC	液性限界以上の含水比で繰り返し、過圧密状態で静的せん断	140 %	350, 380, 444, 502→294 kPa 330→229 kPa, 390→132 kPa etc.
RNC	液性限界以下の含水比で繰り返し、正規圧密状態で静的せん断	37.3, 34.9 %	98, 196, 294, 392 kPa
CNC	NC 試料を非排水繰り返しせん断後、非圧密状態あるいは再圧密して静的せん断	140 %	非圧密状態 17, 118 kPa etc. 再圧密状態 186, 294 kPa etc.

で示される。したがって、NC、RNC に対して提示したパラメーター  $b$  は UNC に対しても適用可能であることがわかる。今回、1 種類の不攪乱試料に対してのみ実験を行ったが、今後、種々の粘性土に対してその適用性を調べる必要があろう。

### 3. 静的せん断特性に与える繰り返し载荷の影響

非排水状態で正規圧密粘土に繰り返しせん断応力が作用すると、過剰間隙水圧が発生し過圧密領域に状態が移行する。しかし、単なる過圧密状態と異なって繰り返しせん断による構造の乱れの影響も当然受けていると思われる。従来、繰り返し荷重を受けた後の静的せん断特性については、過圧密状態としての見方に主眼をおいて、いくつかの報告がなされている<sup>10),11)</sup>が、乱れがせん断特性に与える影響についてはほとんど論じられていない。それは、構造が完全に乱された粘土の力学特性が十分把握されていなかったことに起因すると考えられる。そこで、前述した結果をふまえて繰り返し荷重を受けた後の静的せん断特性を過圧密と構造の乱れという観点から考察を加えた。

#### (1) 試料, 実験方法

試料にはカオリンが主成分の乱した粘土 (Specimen B) を用いた。その物性、粒径加積曲線はそれぞれ Table 1, Fig. 1 に示してある。

非排水繰り返し载荷試験はおもにひずみ振幅一定で行い、変位速度は 3.5 mm/min である。繰り返し载荷を受けた後の静的せん断試験は、繰り返し载荷時に発生した過剰間隙水圧を消散させない場合と、間隙水圧を消散させ再圧密した場合に対して行った。初期圧密圧力は等方圧でおもに 294 kPa で行った。

前記したように、繰り返し载荷後の静的せん断特性は過圧密と構造の乱れの影響を受けると考えられる。そこで、構造の乱れの影響も過圧密の影響も受けていないと考えられる NC と構造の乱れの影響を受けた RNC、それに過圧密の影響を受けた液性限界以上の高含水比で繰り返し再圧密した過圧密供試体 (OC) に対しても実験

を行った。

静的せん断試験は、側圧一定の圧密非排水三軸圧縮試験で行った。圧密は等方圧で圧密時間は 24 時間とし、変位速度は 0.044 mm/min である。供試体の寸法は  $\phi$  35 mm,  $h=80$  mm で行った。せん断時にはバックプレッシャー 196 kPa を作用させ、間隙圧係数の  $B$  値は 0.95 以上である。Table 3 に行った各種試験の概要を示した。また、一部不攪乱試料 (Specimen A) を用いての実験も行ったので結果に示した。

#### (2) 実験結果と考察

##### a) 繰り返し载荷後の圧縮特性

非排水条件下で繰り返し载荷を行うと過圧密状態に移行する。繰り返し载荷後の圧縮特性の一例を Fig. 7 に示す。繰り返し载荷時の含水比は 28.96%~29.18% の範囲にあり、ほとんどばらつきがないので 1 点で示した。同図から過圧密状態での圧縮指数 (割線係数でとってある) は繰り返し载荷時に発生した過剰間隙水圧の大きさにかかわらず、同一図上に実線で示した NC 線よりも破線で示した過圧密の膨潤指数に近いことがわかる。これから、過圧密状態での圧縮指数は構造の乱れの影響よりも過圧密の影響をより大きく受けていると思われるが、詳細なデータが不足しているのでこれ以上の言及を避け

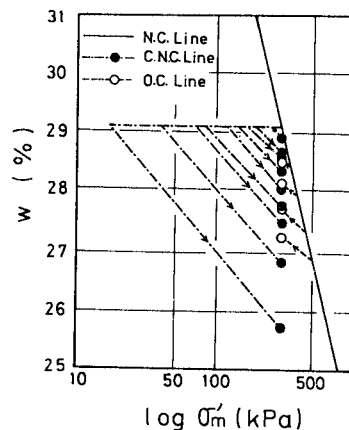


Fig. 7  $w-\log \sigma'_m$  diagram.

る。

また、発生した過剰間隙水圧は同一であるが、ひずみ振幅や繰り返し回数を変えることによりせん断履歴の異なっている試料の圧縮特性を調べたが、過圧密状態での圧縮指数にほとんど差はみられなかった。すなわち、繰り返しせん断履歴が異なっても発生した過剰間隙水圧が同一であれば再圧密時の含水比は等しくなり、発生した過剰間隙水圧と再圧密後の含水比は1対1の対応を示している。

b) 繰り返し载荷後の有効応力径路

有効応力径路はせん断中に発生する間隙水圧の挙動、すなわち、ダイレイタンスー特性を表わしひいては応力~ひずみ関係に影響するものとして重要な性質の1つである。飽和粘性土では、有効応力径路はせん断時の圧密圧力と含水比により一義的に決定されるといわれている。しかし、Fig. 8に示すように、たとえば点Aの状態に至る径路はB→C→A (CNC: 繰り返しせん断応力を受けた供試体), D→A (OC), それとRNC等数多く存在する。

まず、点Aで示す状態での比較を行う。静的せん断時の圧密圧力と含水比が同じで、その状態に至る径路が異なるRNC, CNC, それにOCの有効応力径路をFig. 9

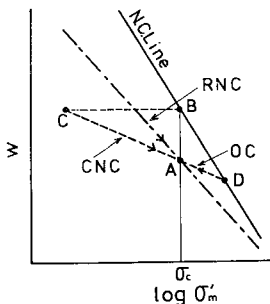


Fig. 8 Schematic  $w \sim \log \sigma'_m$  diagram showing several ways to the state A.

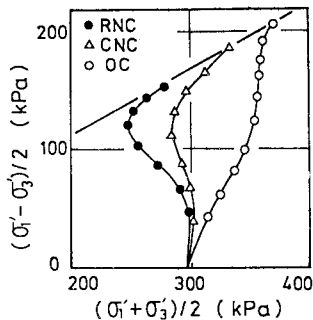


Fig. 9 Comparison of stress paths for OC, RNC and CNC at the same water content and the same consolidation pressure.

に示す。RNCとCNCそれにOCはその傾向に大きな差がみられる。その原因として応力履歴の有無、構造の乱れの有無が挙げられる。CNCの有効応力径路はRNCとOCの間に位置しており、過圧密(応力履歴)と構造の乱れの両者の影響を受けていることがわかる。また、含水比と圧密圧力が等しくても、破壊時の強度はOCが最も大きく、次いでCNC, RNCの順になっており、OCに比べてRNCは2~3割程度強度が小さい。このように、飽和粘性土は圧密圧力と含水比によりその有効応力径路を一義的に決定できず、また繰り返し载荷を受けた点Aの状態の試料の有効応力径路は構造の乱れの影響を無視できないことがわかった。

繰り返しせん断応力の履歴が異なっていて、再圧密時の含水比が等しい供試体の有効応力径路の比較を試みる。前記したように、Fig. 8でC→Aに至る過圧密状態での圧縮指数は繰り返しせん断応力の履歴に関係なく、ほぼ一義的に定まる。したがって、繰り返しせん断応力の履歴が異なり再圧密時含水比の等しい供試体を作るには、Fig. 8でB→Cに至る際の繰り返しせん断応力の振幅や繰り返し回数を種々変えてやればよい。繰り返しせん断応力の履歴は異なるが、再圧密時の含水比の等しい供試体の静的三軸圧縮試験結果をFig. 10に示す。1つはひずみ振幅  $\epsilon_a = 0.5\%$  で繰り返し回数  $N = 4$  回の繰り返し载荷を行い、他の1つは  $\epsilon_a = 0.15\%$  で  $N = 100$  回の繰り返し载荷を行い、载荷終了時発生した過剰間隙水圧  $\Delta u$  がともに137 kPaであり、それを再圧密して試験して求めた有効応力径路である。これから、繰り返しせん断応力の履歴は大きく異なっても発生した過剰間隙水圧が等しければ、再圧密状態での有効応力径路は等しくなることがわかる。

次に、繰り返し载荷により発生した過剰間隙水圧を消散させず、Fig. 8の点Cに示す状態で静的三軸圧縮試験を行った結果をFig. 11に示す。同図には、同一含水比を有するOCとNCそれとRNCの有効応力径路を併記

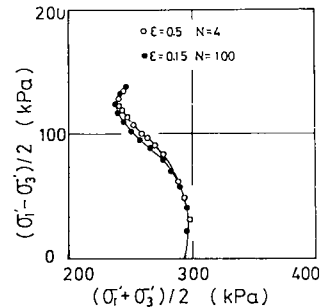


Fig. 10 Effective stress paths for two CNC clays of the same water content and the same consolidation pressure.

してある。まず、同一含水比、同一圧密圧力でのRNCとCNCそれにOCの有効応力径路を比べる。CNCとOCの有効応力径路にはほとんど差がみられず、限界状態線に収束する傾向を示しているが、RNCの有効応力径路はCNC、OCのそれとかなり異なりせん断強度も小さい。これから、繰り返し荷重により発生した過剰間隙水圧を消散させ再圧密させた点Aの状態の有効応力径路は構造の乱れと過圧密の両者の影響を受けていたが、消散させない点Cの状態での有効応力径路は構造の乱れの影響をほとんど受けず、過圧密の影響を顕著に受けていることがわかる。また、同一含水比のCNCとNCそれにOCはほぼ等しいピーク強度を示しており、ピーク強度にも繰り返しせん断履歴は影響しないという結果になっている。

ここで、点Cの状態より点Aの状態の方が有効応力径路に与える構造の乱れの影響が大きいという実験結果について考えてみる。Fig. 8のBC間ではB点までの正規圧密とB点からの繰り返しせん断による乱れを受けている。また、D点まで圧密されてA点やC点の状態にあるOCはB点より大きいD点での正規圧密圧力による乱れを受けている。点Aの状態にあるCNCはC点まで

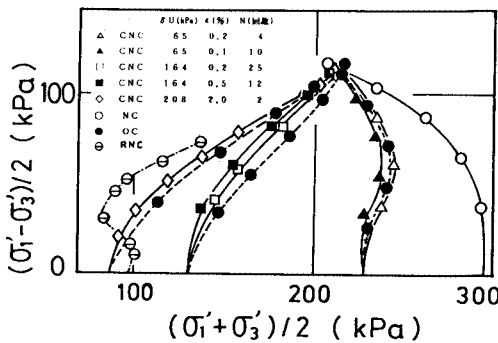


Fig. 11 Effective stress paths for NC, OC and CNC of the same water content.

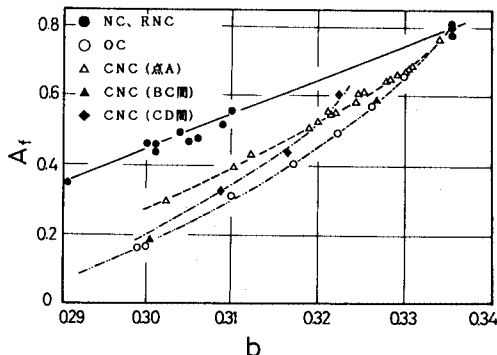


Fig. 12 Relationship between *b*-value and  $A_r$ .

に受けた繰り返しせん断による乱れとCからAに至る圧密による乱れを受けている。ところで、乱れはせん断変形や圧縮による土粒子骨格構造の崩壊と考えられるので、乱れの大小は骨格構造の崩壊の大きさや多少によると思われる。このような観点からみると、Fig. 8のBからCに至った試料とBからCさらにAに至った試料を比べると乱れという点では後者の方が大きくなる。応力径路への乱れの影響を評価するのに、乱れが大きいほどせん断によって大きな間隙水圧が発生すると考えれば、BからCに至った試料よりもBからCさらにAに至った試料の方が有効応力径路が左寄りになるということになるが、詳しいことはわからないのでこれ以上の考察を避ける。

繰り返しせん断履歴が異なっていて、発生した過剰間隙水圧が等しい供試体の有効応力径路の比較を試みる。Fig. 11の有効圧密圧力 130 kPa, 229 kPaの試料の有効応力径路をみてわかるように、発生した過剰間隙水圧が等しければ、繰り返しせん断履歴が大きく異なっても有効応力径路にほとんど違いはみられず、発生した過剰間隙水圧により有効応力径路は決定される。

c) 破壊時の間隙圧係数  $A_r$  と *b* の関係

UNC, NC, RNCの破壊時の間隙圧係数  $A_r$  はパラメーター *b* を用いて一義的に評価できることをすでに示した。NC, RNC, OC, CNCに対する *b* と  $A_r$  の関係をFig. 12に示す。図中、破線で示したものは、繰り返し荷重により発生した過剰間隙水圧を消散させて再圧密し、Fig. 8の点Aの状態を試験したものであり、一点鎖線はFig. 8に示すC, D間の任意の状態で再圧密して試験し、求めたものである。NC, RNCは図に示す直線関係にあるが、OCはNC, RNCの関係とは別の関係にあり、同一*b*値で  $A_r$  はNC, RNCよりかなり小さい。これは、応力履歴の影響であろう。CNCはOCとRNCの間であり、繰り返し荷重による構造の乱れと過圧密の両者の影響を受けていることが明らかである。

Fig. 8の点Aで示される状態の試料の  $A_r$  と *b* の関係は破線で示す線にすべて存在する。繰り返し荷重はひずみ振幅を0.1%から4.0%まで種々変え、また、繰り返し回数も1回から150回まで変化させて種々与えてあり、それに不規則せん断応力を作用させたものも含んでいるが、破線に示すような一義の関係にあることから、繰り返し荷重後、点Aの状態で再圧密した供試体の静的せん断時の間隙圧係数は繰り返しせん断応力の履歴によらず、*b* 値と一義の関係にあると考えてよいであろう。また、一点鎖線で示すように繰り返し荷重後、再圧密圧力を大きくするにつれ過圧密の影響が小さくなって、構造の乱れの影響が徐々に大きくなるのがわかる。

Fig. 13に不攪乱試料 (Specimen A) に対する *b* と

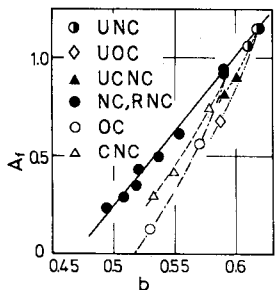


Fig. 13 Relationship between  $b$ -value and  $A_r$ .

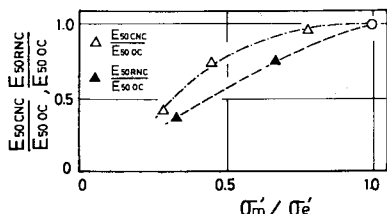


Fig. 14 Relationship between  $\sigma'_m/\sigma'_e$  and  $(E_{50\text{ CNC}}/E_{50\text{ OC}})$ ,  $(E_{50\text{ RNC}}/E_{50\text{ OC}})$ .

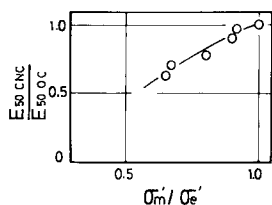


Fig. 15 Relationship between  $\sigma'_m/\sigma'_e$  and  $(E_{50\text{ CNC}}/E_{50\text{ OC}})$ .

$A_r$  の関係を示す。図中、不攪乱試料の過圧密供試体を UOC で、不攪乱試料に繰り返し載荷を与えた後再圧密した供試体に対する実験結果を UCNC で示してある。UCNC, CNC とも Fig. 8 の点 A の状態で試験して求めたものである。実験数が少ないことと初期含水比に若干のばらつきがあることから結論的なことはいえないが、Fig. 12 に示した Specimen B にみられるような関係が不攪乱試料に対してもみられるようである。

d) 変形係数の変化

繰り返し載荷により発生した過剰間隙水圧を消散させない点 C の状態での、同一含水比、同一圧密圧力における変形係数比  $E_{50\text{ CNC}}/E_{50\text{ OC}}$ ,  $E_{50\text{ RNC}}/E_{50\text{ OC}}$  と  $\sigma'_m/\sigma'_e$  の関係を Fig. 14 に、また、水圧を消散させ再圧密した点 A の状態での、同一含水比、同一圧密圧力における変形係数比  $E_{50\text{ CNC}}/E_{50\text{ OC}}$  と  $\sigma'_m/\sigma'_e$  の関係を Fig. 15 に示す。 $\sigma'_e$  は NC 線上への等価圧密圧力であり、 $\sigma'_m$  は静的せん断時の圧密圧力である。

過剰間隙水圧を消散させない点 C の状態での CNC の変形係数は、従来指摘されているように<sup>12)</sup>過圧密のそれ

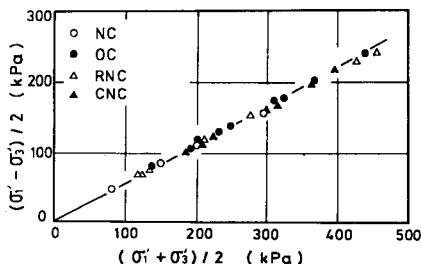


Fig. 16 Failure line terms of effective stress.

より小さく、発生した水圧が大きくなるほど変形係数比の低下が著しい。また、RNC の変形係数に比べて CNC の変形係数の方が大きく、過圧密と構造の乱れの両者の影響を受けていることがわかる。

過剰間隙水圧を消散させ再圧密した点 A の状態でも、CNC の変形係数の方が OC のそれに比べて小さい。なお、点 A の状態では OC, CNC の試料と同一含水比の RNC の試料を作成できなかったため、RNC に対しての結果はなく、RNC との比較はできなかった。しかし、圧密圧力が等しく、CNC に比べて含水比が低い RNC の変形係数は CNC のそれより小さかったため、同一含水比でもやはり RNC の方が CNC の変形係数より小さいであろう。

e) 見掛けの強度定数

有効応力規準による見掛けの粘着力  $c'$  および見掛けの内部摩擦角  $\phi'$  を求めるために  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$  と  $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  の関係を Fig. 16 に示す。同図には繰り返し載荷による過剰間隙水圧を消散させない場合と消散させて再圧密させた場合の両方の結果を示してある。幾分ばらつきはあるが、NC, OC, RNC, CNC ともほぼ原点を通る直線上にあり、繰り返し載荷による構造の乱れ、有効応力の変化といったものは、見掛けの強度定数にあまり影響を与えないことがわかる。

また、同一圧密圧力、同一含水比での強度は水圧を消散させ再圧密した場合には Fig. 9 に示すように OC が一番大きく、次いで CNC, RNC の順になっている。水圧を消散させない場合は Fig. 11 に示すように OC と CNC の強度がほぼ等しく、RNC の強度はそれより小さい。これらのピーク強度の差は、せん断時の水圧の出方の違いによる。

4. 結 論

初期の構造が異なる飽和粘土試料の力学特性を三軸圧縮試験により調べ、その評価を試みた。また、繰り返し載荷を受けた飽和粘土試料の静的せん断特性を調べ、過圧密と構造の変化という観点から考察を加えた。得られた結論を要約すると次のようである。

(1) NC, OC の限界状態線の傾きをもとにしたパラメーター  $b$  を導入することにより, 初期の構造が異なる UNC, NC, RNC の破壊時の間隙圧係数  $A_r$  を一義的に評価できる。

(2) 繰り返し载荷後の過圧密状態での圧縮指数は, 過圧密の膨潤指数とほぼ等しい。また, 繰り返しせん断履歴が異なっても発生した過剰間隙水圧が同一であれば, 過圧密状態での圧縮指数に変化はない。

(3) 繰り返し载荷後の静的せん断特性は, 過圧密の影響だけでなく構造の乱れの影響も顕著に受けており, 有効応力径路や変形係数の違いとなって現われる。

(4) 繰り返し载荷を受けた試料の静的せん断特性は  $b$  と  $A_r$  の関係が一義的に定まり, さらに  $b$  値が等しければ繰り返しせん断応力履歴に無関係に有効応力径路が定まる。

(5) 見掛けの強度定数は UNC, NC, OC, RNC, CNC で顕著な差はない。また, 含水比と圧密圧力が等しければ, 非排水せん断強度は大きい順に OC, CNC, RNC である。これは, せん断時の間隙水圧の出方の違いによる。

本研究を行うにあたり, 元学生 松村真一郎氏, 山田辰己氏の協力を得た。また, 不攪乱試料は基礎地盤コンサルタントのご好意によるものである。記して感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) Marsal, R. J. : Contact forces in soilsand rockfill material, Proc. 2nd Panam. Conf. SMFE, pp. 67~98, 1963.
- 2) Oda, M. : The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, pp. 1~18, 1972.
- 3) 最上武雄 : 粒状体の力学, 最上編・土質力学, 技報堂, 1969.
- 4) 落合英俊・山内豊聡 : 二次元積層体によるせん断中の間げき比の変化について, 土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp. 113~114, 1972.
- 5) Murayama, S. and Matsuoka, H. : A microscopic study on shearing mechanism of soils, Proc. 8th ICSMFE, pp. 293~298, 1973.
- 6) Rusch, R. : Microstructural changes in soft quick clay at failure, Canadian Geotechnical Jour. Vol. 7, No. 1, pp. 1~7, 1970.
- 7) Collins, K. and McGown, A. : The form and foundation of microfabric features in a variety of natural soils, Geotechnique, Vol. 24, No. 2, pp. 223~254, 1974.
- 8) 八木則男・矢田部龍一・松村真一郎 : 繰り返し時含水比の異なる再圧密土の力学特性, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp. 99~106, 1983.
- 9) Schmertman, J. H. : The undisturbed consolidation behavior of clay, Trans. ASCE, Vol. 120, pp. 1201~1233, 1955.
- 10) 松井 保・小原秀夫・伊藤富雄 : 飽和粘土の力学的特性に及ぼす動的応力履歴の影響, 土木学会論文報告集, 第 257 号, pp. 41~52, 1977.
- 11) 佐々木康・谷口栄一・唐沢安秋・森本克則 : 飽和粘土の動的強度特性に関するくり返し三軸試験, 第 16 回土質工学研究発表会講演集, pp. 665~668, 1981.
- 12) 松井 保・阿部信晴・松井賢二・田中信佳 : 繰り返し応力, ひずみ履歴を受けた飽和粘土のせん断特性, 第 15 回土質工学研究発表会講演集, pp. 621~624, 1980.

(1984. 6. 21・受付)