

各種の応力履歴を受けた再構成粘土の力学特性

Mechanical properties of reconstituted clay under various stress history

吉田賢史¹, 三好直輔¹, 福沢宏樹², 小高猛司³, 崔 瑛³, 板橋一雄⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 2 ニュージェック (元名城大院)
- 3 名城大学・理工学部建設システム工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 4 名城大学・常勤理事

概 要

スラリーから予圧密によって作製した再構成有楽町粘土を用いて、各種の応力履歴を受けた粘土供試体の力学挙動について、三軸試験と単純せん断試験の結果を用いて考察した。まず、予圧密の圧密履歴による初期異方性を検討するため、予圧密後の再構成粘土を圧密方向と同一の鉛直方向とそれと直交する水平方向の2種で切り出した供試体を作製し、三軸試験を実施した。両者の試験結果は若干異なるが、いずれの応力経路においても軸差応力が単調に増加しながら限界状態に到達しており、初期異方性の影響は小さいことがわかった。一方、含水比を変えないように再構成粘土を練り返した「練返し供試体」も作製して力学挙動を比較した。練返し供試体では、限界状態線付近までは再構成粘土とほぼ同様の挙動を示すが、最終段階で急激に正のダイレイタンスーが発現し、軸差応力が増加する「巻き返し」がみられた。これは、圧密試験結果から考察すると、予圧密後に過圧密状態に置かれた再構成粘土をそのままの含水比で練り返すことによって先行圧密履歴が解消され、より過圧密化するためである。そのため、練返し供試体が完全な正規圧密状態となる高拘束圧まで圧密することにより、再構成粘土と同様の力学挙動が得られることを高圧三軸試験によって確認することを試みた。

キーワード：再構成粘土，練返し供試体，三軸試験，単純せん断試験，初期異方性

1. はじめに

自然堆積粘土は、地質学的な長い時間を経た堆積環境によって、土粒子の骨格構造が形成され、過圧密性や異方性が発現している。構造が卓越した不攪乱粘土は一般に鋭敏性が高いと判断され、その鋭敏性を評価するためには、練り返して構造を乱した攪乱粘土での試験結果と、不攪乱粘土の結果を比較する必要がある。三好ら¹⁾は、練り返した攪乱試料を用いて三軸試験を実施した結果、不攪乱試料に現れるひずみ軟化挙動は観察されず、せん断後半で正のダイレイタンスー挙動（いわゆる「巻き返し」）が見られることを報告している。一方、構造の低位化を期待してスラリーから作製する再構成粘土では、この巻き返しは観察できない。そこで本研究では、スラリーを予圧密することによって作製する「再構成粘土」と、それを「練り返した」粘土を用いて、「練返し履歴」を受けた粘土の力学挙動を三軸試験と単純せん断試験の結果から考察する。すなわち、「練返し履歴」が構造を劣化させるだけの行為ではないことを明らかにする。さらに、再構成粘土の予圧密時の圧密履歴による初期異方性に関しても考察する。

2. 試験試料と試験の流れ

2.1 試験試料

本研究に使用した試料は東京湾で浚渫採取した有楽町層粘土であり、液性限界が86%、塑性限界が31%、塑性指数が55である。有楽町層粘土を420 μ mフルイで裏濾しし、貝殻などの固形物を取り除き、液性限界の2倍程度の含水比になるように蒸留水を加えてスラリー状にしてから、ミキサーで十分に攪拌した。その後、直径20cmのアクリル円筒容器に試料を入れ、24時間真空ポンプを用いて脱気した後、圧密荷重を5日ほどかけて徐々に増加させてゆき、最終的に100kPaの上載圧で2週間ほど一次元的に予圧密して供試体として再構成した。以降、この状態の粘土を「再構成粘土」と呼ぶ。一方、予圧密後の再構成粘土を、含水比を一定に保ったまま、手こね作業で十分に練り返した供試体も作製した。以降、この状態の粘土を「練返し粘土」と呼ぶ。

2.2 試験の流れ

本研究では、はじめに定ひずみ速度圧密試験（CRS圧密試験）を実施し、再構成粘土と練返し粘土の圧密特性の違

いを検討する。次に、予圧密の圧密履歴による初期異方性の影響について検討するため、予圧密後の再構成粘土を圧密方向と同一の鉛直方向に切り出した供試体（鉛直供試体）と、それと直交する水平方向に切り出した供試体（水平供試体）を作製し、三軸試験を実施する。次に、三軸試験と単純せん断試験を実施し、再構成粘土と練返し粘土の力学挙動の比較を行う。また、各種の応力履歴が消去される正規圧密状態を探るために、高圧三軸試験を実施する。

3. 試験装置の概要と各試験の手順

3.1 CRS 圧密試験装置

本研究で用いた CRS 試験装置は、荷重機構にメガトルクモータを使用していることにより、位置決めが極めて高精度の分解能（ $0.1\mu\text{m}$ 以下）で可能なために、モーターによる荷重軸の制御がそのまま変位の計測も兼ねることができ、高効率かつ高精度の実験ができる。荷重速度は $2\%/\text{min} \sim 0.00002\%/\text{min}$ まで 100 万倍の幅で随時可変できる。また、プログラムの制御により定圧試験も可能である。供試体は直径 60mm、高さ 20mm の円柱形である。成型した供試体をガイドリング内に入れ、圧密試験装置の底板に設置し、圧密容器を被せる。その後、メガトルクモータを用いて、荷重速度 $0.02\%/\text{min}$ で実施した。

3.2 三軸試験装置

写真 1 に三軸試験装置の全景を示す。荷重機構は、単調荷重による圧縮・伸張試験に関しては、DC サーボモータで制御するスクリージャッキによる軸ひずみ速度制御であり、軸ひずみ荷重速度を一定（ $0.002 \sim 2.0\text{mm}/\text{min}$ ）で荷重することができる。供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm の円柱形である。成形した供試体をセルに設置後、二重負圧法によって飽和化を行う。背圧を 200kPa 作用させながら、24 時間かけて十分に圧密を行い、非排水せん断試験を実施した。また、荷重速度は $0.1\%/\text{min}$ のひずみ速度制御とした。

3.3 単純せん断試験装置

荷重機構はスクリージャッキをパルスモーターとハーモニックドライブ減速機で制御しており、広範囲なせん断ひずみ速度（ $0.002 \sim 0.6\%/\text{min}$ ）での試験が可能である。また荷重の計測には、鉛直荷重、水平荷重ともに内部ロードセルを用い、水平変位は上部ペダスタルの移動量をギャップセンサーで計測している。また、供試体寸法は直径 60mm、高さ 30mm であるため、シンウォールサンプラーで採取した自然堆積粘土の試験でも無理なく実施することができる。上下ペダスタルには刃付きのポーラスストーン（金属刃 高さ 0.5mm 、厚さ 1.5mm ）を設置しており、供試体との摩擦を十分に確保したうえで上部ペダスタルを水平移動させることによって単純せん断試験を行う。なお、せん断中の単純せん断モードを確保するために、写真 2 に示すように水が入ったセル内において、メンブレンを被せた供試体の外側に、供試体径と同じ内径の穴を持つ厚さ 1mm のドーナツ形状の多層ス

リップリングを 30 枚積層させて設置し、供試体側面形状を等変位に拘束しながら非排水条件による定体積せん断を実施している。また、鉛直荷重軸は固定したまません断することで、異方圧密条件下でも無理なく定体積単純せん断が可能である。供試体側面形状を等変位に拘束すれば、完全な単純せん断モードを実現することが可能であることは数値解析でも示されているが、実際には圧密過程において、供試体とスリップリングの間に遊びが生じるために、完全な単純せん断モードを満たしていないことに注意する。三軸試験と同様に成型した供試体をセルに設置後、二重負圧法によって飽和化を行う。背圧を 200kPa 作用させながら、20 時間圧密した後、非排水せん断試験を実施した。また、荷重速度は $0.1\%/\text{min}$ のひずみ速度制御とした。

3.4 高圧三軸試験装置

写真 3 に高圧三軸試験装置の全景を示す。荷重機構には、メガトルクモータを使用しており、高精度の分解能での軸



写真 1 三軸試験装置の全景

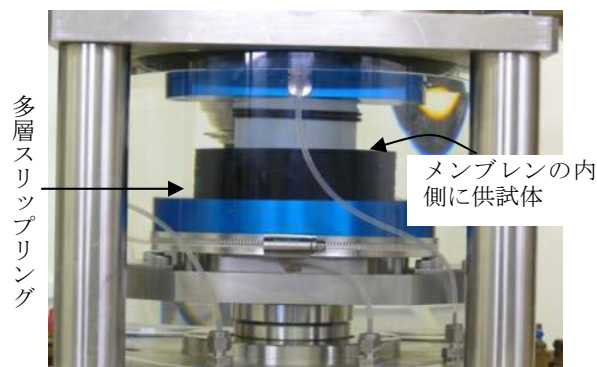


写真 2 単純せん断試験機のセル内の様子



写真 3 高圧三軸試験装置の全景

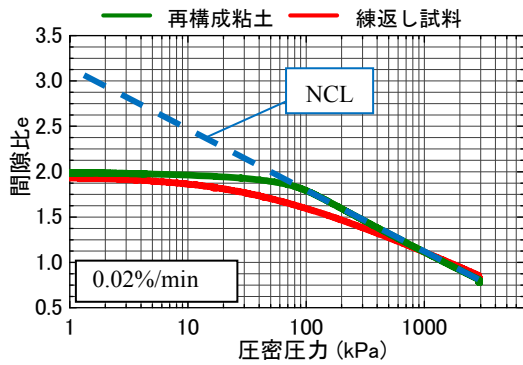


図1 再構成粘土と練返し試料のCRS圧密試験結果の比較

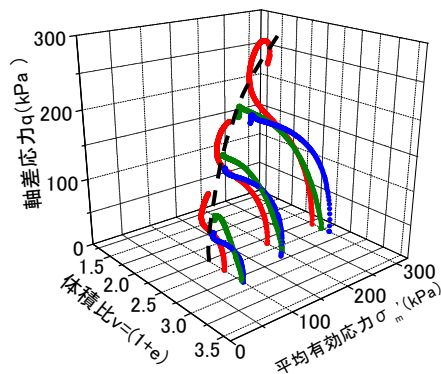


図3 三次元空間上の有効応力経路

圧縮荷重が可能である。軸ひずみ荷重速度は 0.01%/min～2%/min まで可変できる。また、ベロフラム式増圧装置を用いており、最大 3MPa までセル圧を載荷することが可能である。供試体寸法は直径 35mm、高さ 80mm の円柱形である。成形した供試体をセルに設置後、背圧を 200kPa 作用させて飽和化を行う。その後圧密を行い、非排水条件でせん断試験を実施した。荷重速度は 0.1%/min のひずみ速度制御とした。

4. 試験結果

4.1 CRS 圧密試験

図1に鉛直に切り出した再構成粘土と練返し粘土のCRS圧密試験結果を示す。再構成粘土では 100kPa の上載圧で予圧密した履歴を反映して、明確に 100kPa 程度の圧密降伏応力が観察できる。圧縮曲線の高拘束圧領域を含む曲線(青の破線)を正規圧密曲線(NCL)と考える。一方、練返し粘土は、予圧密後の過圧密状態にある再構成粘土を、その間隙比のまま練返ししたものであり、かつ、予圧密時の履歴も完全に消去されてしまっている。そのため、100kPa 程度まで圧密しても NCL 上に戻ることができず、いつまでも過圧密状態が続いている。また、再構成粘土の圧縮曲線で観察される「嵩張り」は観察できず、明確な p_c も分からない。それぞれの圧密曲線は圧密圧力 800kPa 付近で重なっており、その付近であれば練返し履歴が消去されるものと推測できる。

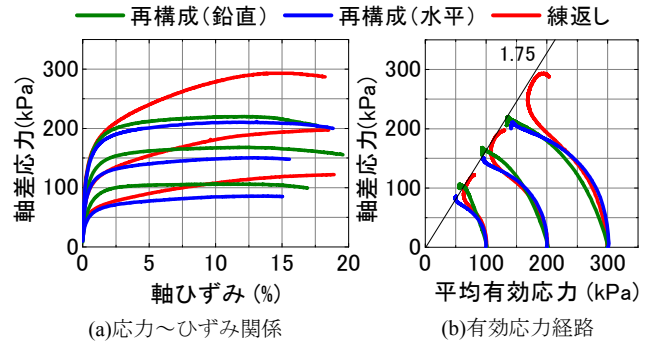


図2 再構成有楽町粘土と練返し試料の三軸試験結果

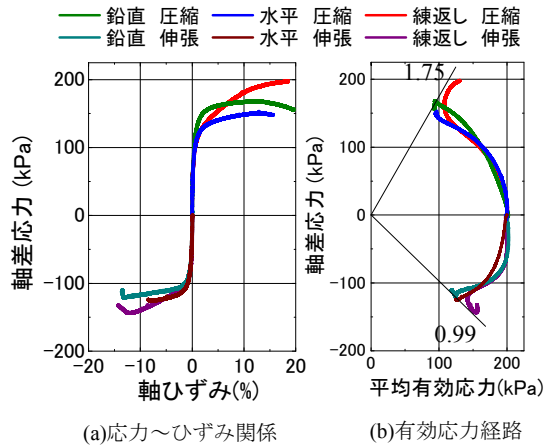


図4 再構成粘土と練返し試料の三軸圧縮・伸張試験結果

4.2 三軸試験

図2は再構成粘土と練返し粘土の三軸圧縮試験結果である。切り出し方向の異なる再構成粘土の試験結果を比較すると、予圧密時と最大主応力方向を一致させている鉛直供試体の方が、予圧密時の圧密方向と直交するように切り出した水平供試体よりも軸差応力が若干大きく現れている。これは、予圧密時の異方圧密履歴の影響と考えられるが、初期有効拘束圧が大きくなるに従い、鉛直供試体と水平供試体との軸差応力の差が縮まる。また、軸差応力は単調に増加しつつ限界状態線に到達し、そのまま試験が終了している。一方、練返し粘土では、限界状態線付近までは、再構成粘土とほぼ同様のダイレイタンスー挙動を呈しているが、最終段階で急激に正のダイレイタンスーが発現し、軸差応力が増加するいわゆる「巻き返し」が見られる。再構成粘土と練返し粘土は、供試体作製時の間隙比は同一であるが、練返し粘土は CRS 圧密試験結果からもわかるように、等方圧密中の体積変化が大きく、非排水せん断時の間隙比は再構成粘土よりも小さくなる。

図3に軸差応力 $q \sim$ 平均有効応力 $p' \sim$ 体積比 $v (=1+e)$ の空間上で表した有効応力経路を示す。限界状態線は同一と見ることができ、それぞれの体積比(間隙比)に応じた限界状態を目指して軸差応力が増加してゆくものと考えられる。

図4は拘束圧 200kPa で実施した三軸圧縮および伸張試験の結果である。三軸伸張試験では、水平供試体の方が若干であるが、鉛直供試体よりも軸差応力が大きくなってい

る。練返し供試体は、三軸圧縮試験と同様に「巻き返し」の挙動を示している。伸張側でも、再構成粘土と練返し粘土の破壊応力比は同じであるが、その値は圧縮側に比べて非常に小さい。この差が圧縮と伸張との明確な強度差となって現れている。

4.3 単純せん断試験

図5に単純せん断試験結果を示す。この試験においても、再構成粘土のせん断応力は単調に増加しながら、限界状態線に達している。一方、練返し粘土には、試験後半で「巻き返し」の傾向が観察される。破壊応力比は再構成粘土と練返し粘土ともに同一となる。

4.4 三軸試験と単純せん断試験の比較

図6にすべての試験結果を併せて、同一尺度で比較するために、偏差応力テンソルの第2不変量 $\sqrt{2}J_2$ (以下、偏差応力と呼ぶ)と偏差ひずみテンソルの第2不変量 ϵ_s (以下、偏差ひずみ)を用いて示す。有効応力経路を見ると、三軸圧縮、単純せん断、三軸伸張の順に破壊応力比が小さくなっており、载荷モードによって顕著な差が生じている。再構成粘土の切り出し方向による強度差がわずかだったことから、三軸圧縮・伸張の大きな強度差は、初期異方性によるものではなく、誘導異方性や中間主応力の影響によるものと考えられる。以上の実験結果より、練返し粘土で観察された「巻き返し」の挙動について、CRS 圧密試験結果から考察すると、予圧密によって過圧密状態にある再構成粘土を練り返すことにより、先行圧密履歴が解消され、より過圧密化するためであると考えられる。そのため、練返し粘土が完全な正規圧密状態となる高拘束圧まで圧密することにより、再構成粘土と同様の力学挙動が得られるのかどうか、次節の高圧三軸試験によって確認する。

4.5 高圧三軸試験

図7に再構成粘土と練返し粘土を用いて実施した高圧三軸試験結果を示す。比較のため、図2の三軸試験結果を加えてある。高圧三軸試験結果では、試験開始時に全応力線に沿って軸差応力が増加しているが、その後は間隙水圧が発生して有効応力が減少し、限界状態に達している。これは、圧密過程の前段階で背圧を作用させて飽和化を行っているが、二重負圧法を行っていないため、供試体が完全に飽和していないからだと考えられる。破壊応力比は図2に示した三軸試験結果と同じである。また、練返し粘土では試験終盤で「巻き返し」の挙動が見られた。CRS 圧密試験結果より、高拘束圧まで圧密を行い、試験を実施することで「巻き返し」の度合いが小さくなると考えられたが、今回の試験では、練返し粘土の作製時に、含水比が予圧密時点での値よりも低くなり、間隙比も小さくなってしまったため、有効拘束圧 500kPa 程度でも「巻き返し」の挙動が観察されたと考えられる。

5. まとめ

再構成粘土を用いて各種応力履歴による力学特性の検討を行った。初期異方性について検討するため、切り出し

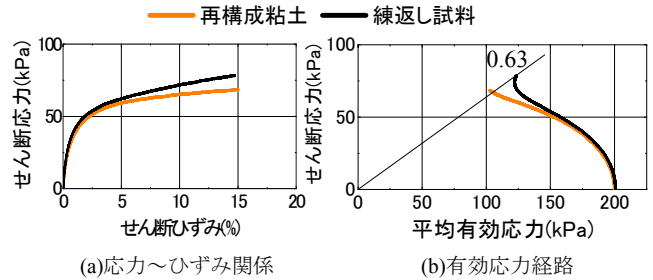


図5 再構成粘土と練返し試料の単純せん断試験結果

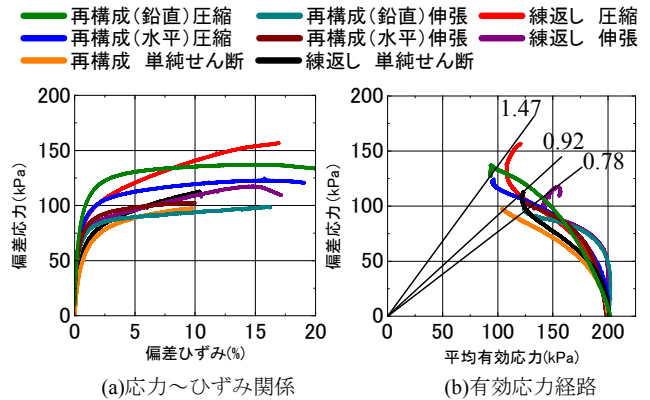


図6 再構成粘土と練返し試料のせん断モードによる比較

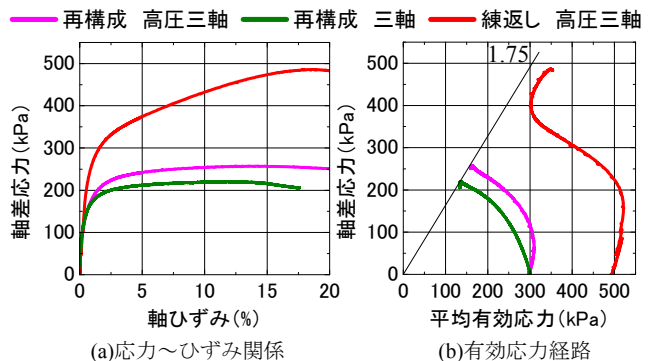


図7 再構成粘土と練返し試料の試験方法の違いによる比較

方向の異なる供試体を用いて三軸試験を実施した結果、強度差にあまり差は見られなかった。しかし、三軸圧縮試験と伸張試験ではせん断モードの影響により大きな強度差が観察された。この試験結果に関連する現象として、不攪乱自然堆積粘土の大きなひずみ軟化挙動も三軸圧縮試験でしか観察できない¹⁾。一方、鋭敏性について検討するため、練返し粘土を用いて実施した三軸試験・単純せん断試験では、どちらの試験結果においても試験終盤で正のダイレイタンスが発生し、「巻き返し」の挙動が観察された。今後は、高圧三軸試験の試験条件を見直しつつ、追加実験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 三好ら：高塑性粘土の力学特性に及ぼす種々の要因についての実験的検討, 第22回中部地盤工学シンポジウム論文集, 2010