

不攪乱・再構成・練返し粘土供試体のせん断挙動の違い

鋭敏粘土 不攪乱粘土 再構成粘土

名城大学

国際会員

小高猛司・板橋一雄

名城大学

学生会員

○三好直輔・吉田賢史

ニュージェック（元名城大院）正会員

福沢宏樹

1. はじめに

東大阪地区の Ma13 沖積粘土は、内湾部の汽水堆積環境で形成されており、比較的鋭敏性が高い¹⁾。不攪乱自然堆積粘土の鋭敏性を議論する際には、練返し試料と一軸圧縮強さの比較を行うことが多い。しかし、練返しによって構造を低位化した攪乱粘土は、力学的な位置づけが不明確である。本報では、大東市赤井で採取した Ma13 沖積粘土の不攪乱試料（以下、不攪乱赤井粘土）とその練返し試料を用いて、三軸試験および単純せん断試験を実施し、両者の力学挙動を比較する。また、有楽町層粘土の再構成粘土（以下、再構成有楽町粘土）と、さらにそれを練り返した試料を用いての比較も行う。以上より、不攪乱粘土に対して、再構成や練返しを経た粘土の力学的な位置づけについて考察する。

2. 試験概要

本報では、三軸試験、単純せん断試験に加え、CRS 圧密試験も実施した。以下、試験試料について説明する。

不攪乱赤井粘土 ($w_L=70\sim80\%$, $w_p=35\%$, $I_p=40\sim50$) は、自然含水比が液性限界を上回っており、練り返して攪乱すると液状になる。今回の試験では、練り返してペースト状になった攪乱試料の表面にペーパータオルを付着させて徐々に脱水させながら、手こね作業で塊状ブロックを形成した後、直径 5cm、高さ 10cm の円柱形をトリミングして三軸供試体を作製した。一方、単純せん断試験や CRS 圧密試験では、練り返した粘土ペーストを直径 6cm の圧密リングに多めに投入し、20kPa の上載圧で 2 日間予圧密させることにより自立する程度の試料とした後、各試験装置に設置した。そのため、三軸試験に供した練返し試料とは異なり、次に述べる再構成試料に近いとも考えられる。

再構成有楽町粘土 ($w_L=86\%$, $w_p=31\%$, $I_p=55$) は、浚渫採取した攪乱試料を w_L の 2 倍の含水比のスラリーに調整してから、上載圧 100kPa で 2 週間予圧密した。予圧密時の履歴による異方性を検討するため、圧密方向と同一の鉛直方向と直交する水平方向の 2 種類の供試体を準備した。一方、再構成有楽町粘土（含水比 71.7～79.0%）に対し、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てから供試体成型した「練返し」試料も準備した。なお、単純せん断試験の供試体は直径 6cm、高さ 3cm の円柱型である。

いずれの試験方法、試験試料においても、供試体をセルに設置後、二重負圧法により飽和化を行い、背圧を 200kPa 作用させながら所定の有効拘束圧で十分に圧密後、非排水せん断を実施した。載荷速度は 0.1%/min とした。

3. 試験結果

図 1 に深度 8.7m の不攪乱赤井粘土とその練返し試料の CRS 圧密試験結果を示す。両試料の圧縮曲線には差があり、練返し試料の間隙比は不攪乱試料より小さい。練返し試料の圧密降伏応力は 20kPa 程度であり、試料作製過程での応力履歴と整合している。高拘束圧領域を含む直線（青の破線）は構造が低位化した粘土の圧縮特性を表す正規圧密曲線（NCL）と考える。不攪乱試料の圧縮曲線は、高位な構造を反映して NCL よりかなり上側に位置し、典型的な「高張り」が観察できる。有効土被り圧を超えてから勾配が急になり、圧密応力の増加につれて NCL に漸近する。

図 2 に再構成有楽町粘土とその練返し試料の CRS 圧密試験結果を示す。再構成試料は 100kPa の上載圧で予圧密した履歴を反映して、この圧縮曲線においても、明確に 100kPa 程度の圧密降伏応力が観察できる。再構成有楽町粘土においては、再構成試料の圧縮曲線の高拘束圧領域を含む直線（青の破線）を正規圧密曲線（NCL）と考える。一方、練返し試料は、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り返したものであり、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 上に返ることができず、いつまでも過圧密状態が続

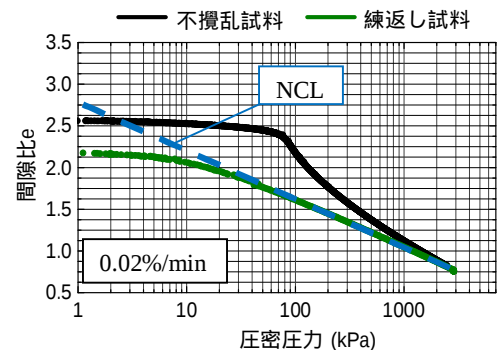


図 1 不攪乱試料と練返し試料を比較した CRS 圧密試験結果（赤井粘土）

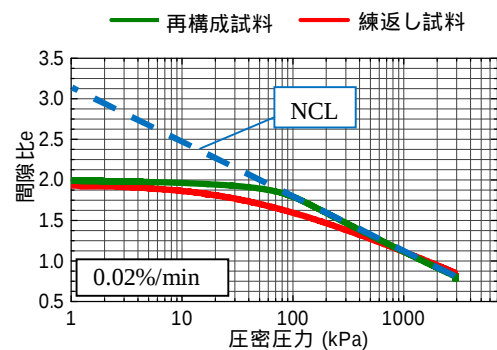


図 2 再構成試料と練返し試料を比較した CRS 圧密試験結果（有楽町粘土）

くことがわかる。

図 3 に深度 11m, 土被り圧 72kPa の不攪乱赤井粘土と練返し赤井粘土を初期有効拘束圧 100kPa で三軸試験した結果を示す。有効応力経路を見ると, 不攪乱粘土では塑性圧縮を伴う軟化挙動を示すが, 練返し粘土ではせん断途中から正のダイレイタンスーが発生する, いわゆる「巻き返し」がみられ, 大きく異なる挙動となった。これは, 練り返したことにより, 不攪乱粘土の構造が低位化したとともに, 供試体作製時の脱水によって若干過圧状態になるためだと考えている。破壊応力比は, 不攪乱粘土は 1.6, 練返し粘土では 1.3 であり, 練返しによる構造劣化により, 破壊応力比が大幅に低下している。

表 1 に不攪乱赤井粘土の単純せん断試験の諸元を, 図 4 にその試験結果を示す。どのケースでも, 三軸圧縮試験で観察されたひずみ軟化挙動は見られず, せん断応力は単調増加している。また, 有効土被り圧程度で圧密した供試体 (CASE A, C, D) では, 等方圧密 (CASE A, D), 異方圧密 (CASE C) とともに破壊応力比に差はない。一方, 過大な有効拘束圧で圧密した供試体 (CASE B) や, 練返し供試体 (CASE E) では破壊応力比が大きく低減している。また, 練返し試料では三軸試験と同様に「巻き返し」が見られる。以上より, 不攪乱粘土の高位な構造によって, 破壊応力比が大きくなることがわかる。

図 5 に再構成有楽町粘土とその練返し試料の三軸試験結果を示す。再構成試料は鉛直方向と水平方向の 2 種類があるが, 予圧密時と三軸試験時の最大主応力方向を一致させた鉛直供試体の方が, 水平供試体より若干軸差応力が大きくなっている。これは予圧密時の異方圧密履歴によるものと考えている。また, 再構成試料では単調に軸差応力が増加しつつ限界状態線 (CSL) に達しているのに対し, 練返し試料では CSL 付近までは再構成試料とほぼ同様のダイレイタンスー挙動を示すが, 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」が見られる。再構成試料と練返し試料とは, 供試体作製時の間隙比は同じであるが, 練返し試料は CRS 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小さい過圧状態にある。軸差応力 ~ 有効応力 ~ 体積比の空間上に表した有効応力経路を図 6 に示す。限界状態線は全ケース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。

4. まとめ

不攪乱粘土の大きなひずみ軟化挙動は, 三軸試験特有の現象であることが分かった。また, 過圧密状態で練り返した粘土は, より一層過圧密となり, せん断の途中で正のダイレイタンスー挙動の「巻き返し」が発現する。練返し試料は, 練返し時の状態が反映されるので, 正確な正規圧密曲線を得るためには, 単なる練返しではなく, スラリー状からの再構成が必要と考えられる。

参考文献: 1) 大島ら: 東大阪地域の鋭敏粘土層の分布域と堆積環境から見たその成因の再検討, 材料, 59(1), 2010.

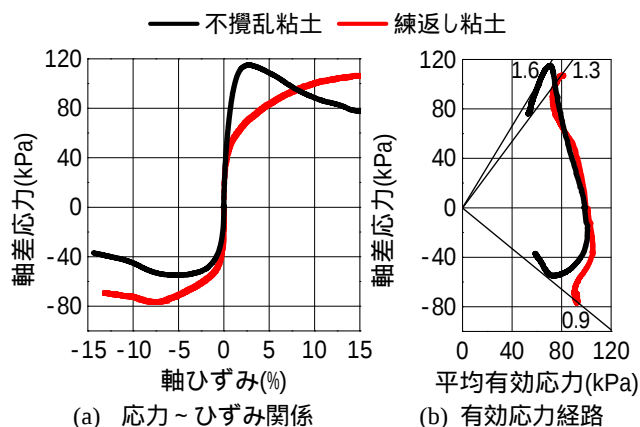


図 3 不攪乱粘土と練り返し粘土の三軸試験結果 (赤井粘土)

表 1 単純せん断試験の圧密条件 (不攪乱赤井粘土)

CASE	深度	土被り圧	K_0	σ_1'	σ_3'	σ_m'
A	7.4m	53kPa	1.0	50kPa	50kPa	50kPa
B	7.4m	53kPa	1.0	100kPa	100kPa	100kPa
C	9.5m	64kPa	0.5	80kPa	40kPa	53kPa
D	9.7m	65kPa	1.0	60kPa	60kPa	60kPa
E	再構成		1.0	60kPa	60kPa	60kPa

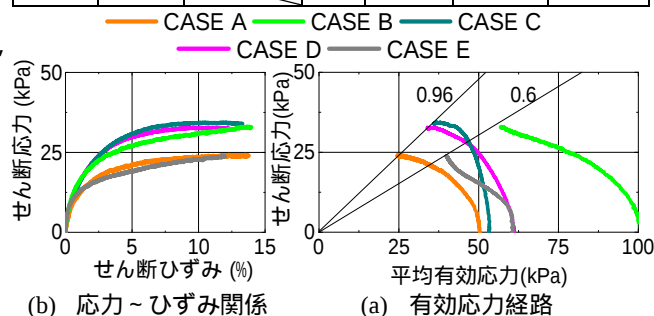


図 4 不攪乱粘土と再構成粘土の単純せん断試験結果 (赤井粘土)

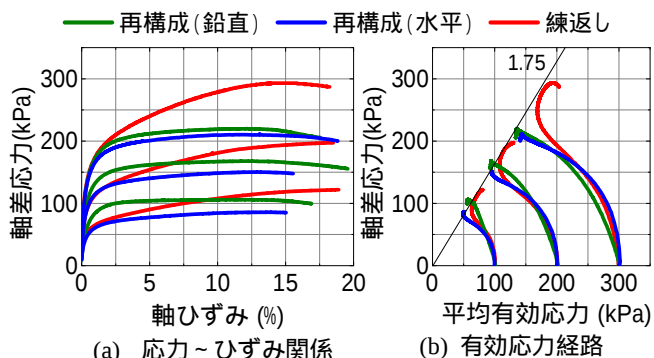


図 5 不攪乱粘土と練り返し粘土の三軸試験結果 (赤井粘土)

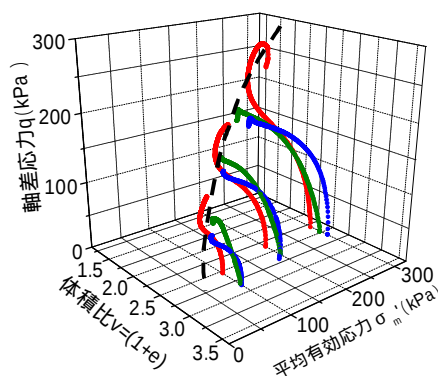


図 6 三次元空間上の有効応力経路