

軟弱粘土の繰返しせん断挙動の把握と骨格構造概念に基づく解釈

名古屋大学大学院 国際会員 中井健太郎・浅岡顕・中野正樹・野田利弘
学生会員 酒井宏和・野中俊宏

1. はじめに

従来の地震時被害 / 対策では砂質地盤の液状化現象に注目されることが多いが、1895年のメチオカン地震¹⁾や1999年のトルコ地震²⁾など、軟弱粘土地盤が関与したと考えられる地震中被害や地震後も継続する大沈下現象が数多く報告され、近年研究も鋭意進められてきている³⁾。ところが、粘土地盤の実務・研究のほとんどでは人工的な繰返し正規圧密粘土を対象にした構成式が用いられており、骨格構造が発達した自然堆積地盤の動的挙動を把握することは十分と言えない。名古屋大学では土の骨格構造（構造、過圧密、異方性）とその発展を考慮した弾塑性構成式（SYSカムクレイモデル⁴⁾）を提案し、鋭敏で軟弱な自然堆積粘土から密度の異なる砂まで、様々な土材料の統一的記述を試みている。

本報告では、最初に三軸試験機を用いて、軟弱な自然堆積粘土の非排水繰返しせん断挙動について調べる。続いて、異なる繰返し載荷履歴を与えた供試体の単調せん断試験を行い、SYSカムクレイモデルの応答と対比することにより、繰返し載荷中の骨格構造変化を推定するとともに、粘土の動的挙動の把握には構造概念が不可欠あることを示す。

2. 試験に用いた試料の特徴

試験に用いた試料は、三重県四日市市周辺から採取した沖積粘土である。物理特性を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。当該粘土層はN値が0~4と小さく、非常に軟弱な粘土である。図-2に、できるだけ乱さないように採取した不攪乱試料を用いた標準圧密試験結果を示す。図中には同粘土を、自然含水比を保ったまま捏ね繰り返して作製した繰返し試料の圧縮線も併記してある。自然堆積土は十分に繰返した正規圧密土よりも同じ応力下で大きな間隙比を取ることができる。SYSカムクレイモデルでは、この嵩張り具合に着目して「構造」を定義しているが、図-2から、この試料が初期に高位な構造を有していることがわかる。鉛直荷重が大きくなり、塑性変形が進展すると、構造は次第に低位化して嵩張りを喪失し、繰返し試料の圧縮線に漸近していく。

3. 自然堆積粘土の非排水繰返しせん断挙動

等方応力状態下における自然堆積粘土の非排水繰返しせん断挙動について調べた。試験はすべて、GL-18.0~-19.9mから採取した不攪乱試料を用いており、可能な限り初期状態に近い供試体を用いた。φ=35mm、h=80mmの円筒形に成形した供試体を三軸試験機にセットした後、背圧を392kPaかけて飽和度を高めている。拘束圧 σ_c は、試料採取深度を考慮して、土被り圧160kPaを挟んだ105kPaと196kPaとし、所定の圧密圧力で48時間等方圧密した後、軸力制御で側圧一定繰返し非

表 - 1 物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.67
液性限界 w_L (%)	59.9
塑性限界 w_p (%)	28.0
塑性指数 I_p	31.9

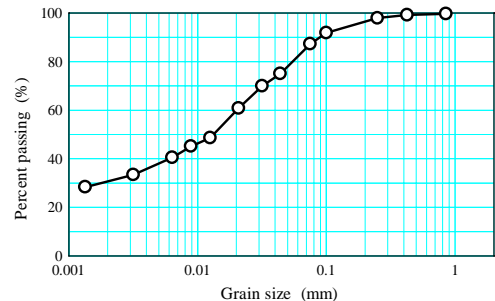


図 - 1 粒径加積曲線

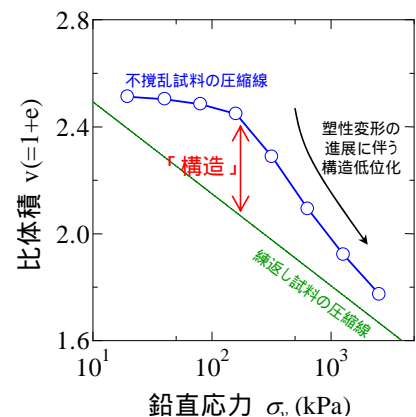


図 - 2 標準圧密試験結果と構造の程度

排水三軸圧縮／伸張試験を実施した。なお、繰返し応力は空圧サーボモーターを利用して、正弦波形で与えている。応力振幅 σ は応力振幅比一定 $\sigma/\sigma_c=0.5$ となるように調整し、繰返し周期は120sと2400sの2通りで実施した。なお、繰返しが速いため、供試体内で間隙水のマイグレーションが十分に生じず、間隙水圧分布は不均質だと考えられるが、本報告で示す試験結果はすべて、供試体下端で測定している間隙水圧を供試体内の代表値と仮定して有効応力を算出し、エレメント挙動としてまとめている。試験条件の一覧を表-2に示す。

図-3にTest-Aの試験結果、(a)軸差応力 q ～軸ひずみ ε_a 関係と(b) q ～平均有効応力 p' 関係を示す。土被り圧以下の拘束圧で等方圧密したため、繰返し载荷前の試料は過圧密状態だと考えられる。なお、試験終了前5回の繰返し挙動は色を変えて示している。繰返し初期こそ p' の減少が見られるが、減少量は次第に小さくなり、 $p'=45\text{kPa}$ ($p'/\sigma_c=0.45$)で細いループを描きながら収束した。300回以上繰り返したにも拘わらず、試験中 ε_a はほとんど発生していない。図-4はTest-Bの試験結果である。拘束圧が土被り圧以上であるため、繰返し载荷前の供試体はほぼ正規圧密状態だと考えられる。Test-A同様、繰返しとともに p' は減少してゆき、最終的には収束する。繰返し初期に p' 減少の程度が大きい点も同じである。しかし、 p' は 40kPa ($p'/\sigma_c=0.2$)まで減少しており、Test-Aよりも p' 減少の程度が大きいことがわかる。また、収束時のループも幅が広い。 ε_a を見てみると、Test-A同様、繰返し初期はほとんど発生しないものの、有効応力パスが収束する頃から次第に、特に伸張側で進展していく。繰返し回数70回で ε_a が-20%を超えると、供試体中央が局所的に細く窪んでしまい、最終的に破壊した。

粘性土のように透水性の低い土材料は、载荷速度によって間隙水のマイグレーションの程度に差異が生じ、その変形挙動が大きく異なることがよく知られている⁵⁾。载荷速度の影響を確認するために、Test-Bに対して繰返し周期のみを2400sに変えて試験を行った。図-5に試験結果(Test-C)を示す。Test-Bは载荷が非常に速いので、供試体内で間隙水のマイグレーションが十分に生じず、供試体下端で計測できる過剰間隙水圧は小さい。Test-Cは、間隙水のマイグレーションが均一となるほど遅い载荷ではないものの、Test-Bよりも間隙水のマイグレーションが十分に生じる

表-2 試験条件一覧

試験名	拘束圧	応力振幅比	繰返し周期	比体積
Test - A	105 kPa	0.5 (50kPa)	120 s	2.46
Test - B	196 kPa	0.5 (100kPa)	120 s	2.54
Test - C	196 kPa	0.5 (100kPa)	2400 s	2.61

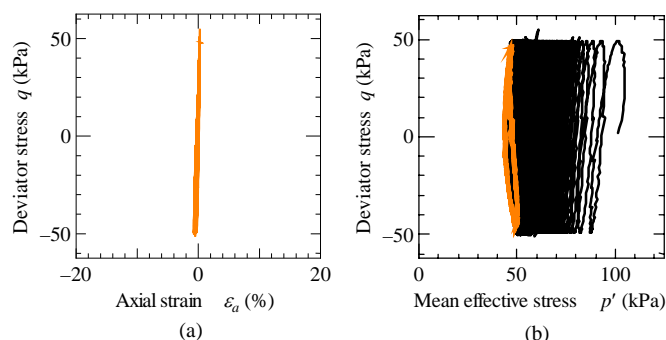


図-3 過圧密状態にある軟弱粘土の非排水繰返しせん断挙動 (Test - A)

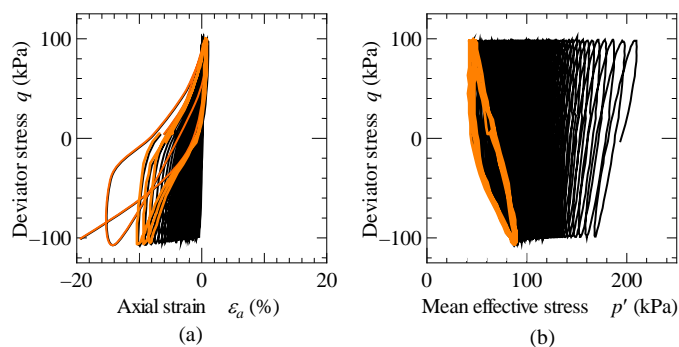


図-4 正規圧密状態にある軟弱粘土の非排水繰返しせん断挙動 (Test - B)

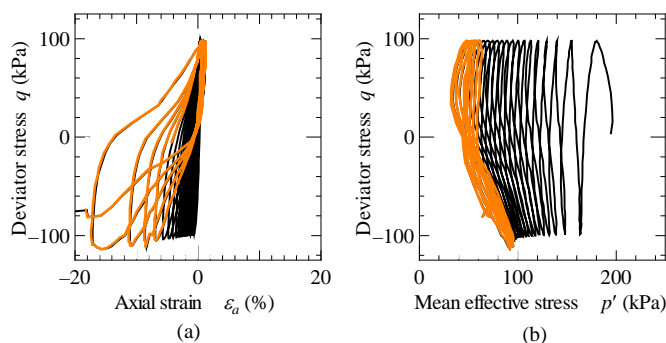


図-5 正規圧密状態にある軟弱粘土の载荷速度が遅い時の非排水繰返しせん断挙動 (Test - C)

ので、供試体下端で計測できる過剰間隙水圧は大きくなる。平均有効応力 p' は全応力 p と過剰間隙水圧の差で求められるので、両試験結果を比較すると、繰返しごとの p' 減少の程度は載荷速度の遅い Test - Cの方が大きくなり、Test - A が 70 回の繰返しで破壊したのに対して Test - C は 33 回で破壊した。 p' 収束時（試験終了直前）の有効応力パスの形状を見ると、Test - B とは異なり、「8」の字型を描いている。ただし、破壊した時の p' は、載荷速度に拘わらずほぼ等しいことがわかる。

以上から、従来は動的課題の対象外とされていた粘土であっても、特に過圧密比が小さい（正規圧密状態にある）軟弱な自然堆積粘土では、非排水繰返しせん断によって、砂のサイクリックモビリティのように、 p' の減少とそれに続く ε_a の進展が生じ、最終的には破壊に至ることがわかった。また、繰返し周期を変化させると、供試体内の間隙水圧分布の不均一性が起因となって、破壊に至るまでの繰返し回数が異なることもわかった。

4. 繰返し履歴の異なる自然堆積粘土の非排水せん断挙動と骨格構造概念に基づく再現

4.1. 繰返し載荷履歴の異なる自然堆積粘土の非排水せん断挙動

本試験に用いた試料はすべて、GL-12.6 ~ -13.5m から採取した不攪乱試料で、土被り圧は約 110kPa である。供試体はすべて同一深度から採取したもので、比体積がほぼ等しい試料を用いた。土被り圧と等しい 110kPa で等方圧密した後、3.と同じ方法で非排水繰返しせん断を与えた。応力振幅比は 0.6、繰返し周期は 20 秒である。任意の繰返し回数で繰返しを止め（図 - 6

参照）排水コックを閉じたまま十分時間を置いてから、軸ひずみ速度一定（0.007mm/min）で単調載荷非排水三軸圧縮試験を実施した。図 - 7 に試験結果を示す。[1]は繰返し載荷履歴なし、[2]は繰返し載荷履歴が小さくて繰返し載荷中に ε_a がほとんど発生していない、[3]は繰返し履歴が大きくて ε_a が 4%程度伸張側で発生した試験結果である。

[2]と[3]の非排水繰返しせん断挙動は、載荷初期の有効応力パスにおいて若干の相違が見られたが、ともに同一深度から採取した試料であり、低 p' 下における有効応力パスの勾配や ε_a 進展の仕方が似ていたことから、同一供試体として取り扱った。図 - 7 (c)を見ると、[1] [3]の順に、初期過剰間隙水圧の値が大きくなっており、繰返し載荷中の平均有効応力減少（過剰間隙水圧の蓄積）の様子がうかがえる。図 - 7 (a)を見ると、繰返し履歴が大きいほど、最大軸差応力は小さくなり、初期剛性が低下していることがわかる。図 - 7 (d)に併記してある正規圧密線 NCL と限界状態線 CSL は、同じ粘土の再構成試料を用いて実施した標準圧密試験および三軸圧縮試験から求めている。せん断終了後もすべての試験結果が NCL の外側に応力状態を取っており、せん断後も構造を残したままであることがわかる。

4.2. 繰返し載荷中の構造低位化過程の記述

図 - 8 は SYS カムクレイモデルによる再現例で

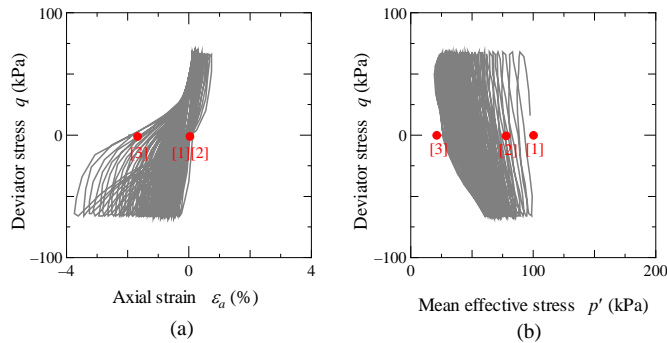


図 - 6 非排水繰返しせん断終了箇所

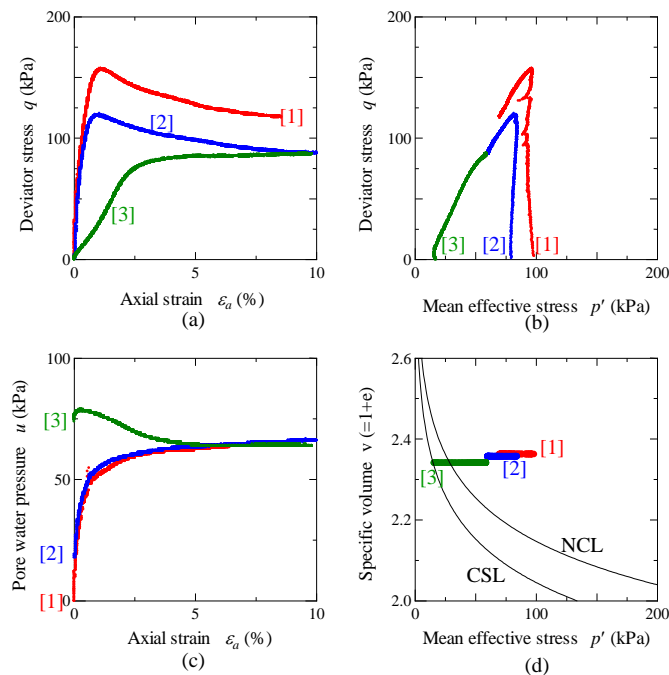


図 - 7 異なる繰返し履歴を受けた軟弱粘土の非排水せん断挙動

ある。実験を模擬して、同じ初期状態から非排水繰返しせん断（実験と回数は異なる）を与え、そのまま非排水せん断した。用いた材料定数は同粘土の各種室内試験結果から求めている⁶⁾。繰返し回数が多く、有効応力が小さいほど、最大軸差応力は小さく、初期剛性は低くなっており、実験結果をよく再現できている。表-3には、非排水せん断前の骨格構造の値を示す。有効応力が小さいほど、構造が低位化しており、繰返し载荷に伴う有効応力減少は、構造低位化が主な原因であることがわかる。試験結果（図-7(d)）でも示したように、繰返し载荷によって構造は低位化するものの、完全には喪失せずに構造は残ったままである。この事は、軟弱粘土地盤で地震被害が繰返し発生する可能性があることを示唆する。

5. おわりに

軟弱な自然堆積粘土は、特に過圧密比が小さい（正規圧密状態にある）時に繰返しせん断を受けると、平均有効応力の減少を伴いながら、最終的には大変形を生じることがわかった。SYSカムクレイモデルに基づく、粘土も砂も骨格構造概念を用いて記述することができ、両者の違いは単位塑性変形あたりの骨格構造変化の程度の差として表現される。砂は構造低位化が顕著に生じるので、特に構造高位な緩詰め砂の場合、平均有効応力が容易にゼロまで減少して液状化する。それに比べ粘土は構造低位化が緩慢に生じるため、平均有効応力がゼロ近傍まで減少することはないが、繰返し载荷によって蓄積した過剰水圧の消散とともに、長時間かけて圧密が進行することとなる。自然堆積地盤の動的挙動把握のためには、骨格構造概念と（塑性変形に伴う）その変化の把握が重要である。

3.でも示したように、透水性の低い粘土では、载荷中、間隙水圧分布が不均一となるので、試験結果を要素挙動として捉えることは本来難しい。今後は初期値境界値問題として解析を実施し、試験結果の更なる考察を進めていきたい。さらに、本報で示した実験はすべて等方応力状態で行っていたので、盛土载荷等がある実地盤を想定した高応力比下での繰返しせん断試験を実施し、構造劣化等の骨格構造変化に着目してゆきたい。

参考文献

- 1) Sasaki, Y., Moriwaki, T. and Ohbayashi, J. (1997): Deformation process of an embankment resting on a liquefiable soil layer, Deformation and progressive failure in geomechanics, Proc. IS-Nagoya'97, pp.553-558.
- 2) Mendoza, M. and Auenet, G. (1988): The Mexico earthquake of September 19, 1985-Behavior of building foundations in Mexico City, Earthquake Spectra, 4, 4, pp.753-770.
- 3) Yasuhara, K., Hirao, K. and Adrian FL Hyde. (1992): Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay, Soil and Foundations, Vol.32, No.1, pp.100-116.
- 4) Asaoka A.et.al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, *Soils & Foundations*, Vol.42, No.5, pp.45-57.
- 5) 浅岡ら. (1993): 繰返し粘土の非排水3軸圧縮試験における間隙水のマイグレーション, 第28回土質工学発表会, pp.741-744.
- 6) 中井健太郎ら. (2006): 地震時に乱された粘土の地震後圧密挙動, 第19回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.107-114.

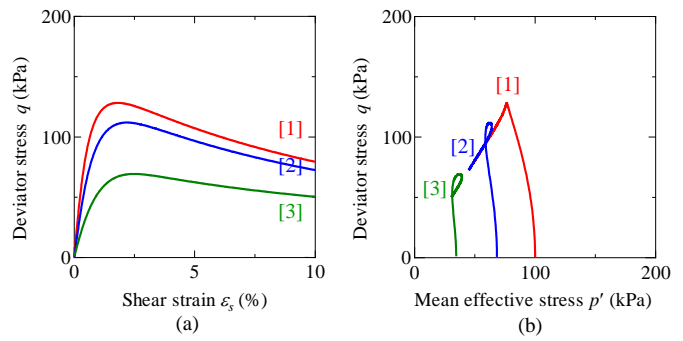


図-8 SYSカムクレイモデルによる再現例

表-3 繰返し载荷に伴う骨格構造の変化

	[1]	[2]	[3]
繰返し回数 (回)	0	2	20
拘束圧 σ'_c (kPa)	100	68.3	34.4
構造の程度 $1/R^*$	20.0	14.4	5.39
過圧密比 $1/R$	1.72	2.16	2.63