

# 繰返し载荷によって乱された自然堆積粘土の圧縮／せん断挙動

繰返し三軸試験, 鋭敏粘土, 構造

名古屋大学 学生会員 ○木野寛生 上山博満

名古屋大学 国際会員 中井健太郎 野田利弘 中野正樹

## 1. はじめに

地震被害と言うと砂質地盤の液状化現象が有名であり、液状化強度特性を調べるために砂質土を用いた非排水繰返しせん断試験が数多く行われている。しかし、粘性土地盤においても、地震中の沈下加速化や地震後長期にわたって継続する圧密沈下などの地震被害が数多く報告されており、近年、粘性土の動的特性把握のための研究も鋭意進められている<sup>1)</sup>。本報では、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特性および繰返しせん断後の圧密特性の把握を試みる。さらに、SYSカムクレイモデル<sup>2)</sup>を搭載した静的／動的水～土連成有限変形解析プログラム **GEOASIA**<sup>3),4)</sup>を用いて実験結果の再現を試み、繰返し载荷によって供試体が乱される（構造の低位化）様子を数値解析的に確認する。

## 2. 実験結果

実験には、三重県四日市市内で採取した沖積粘土の不攪乱試料を使用した。鋭敏比  $S_r$  が 20, N 値が 0~2 と鋭敏で軟弱な粘土である。図-1 に標準圧密試験結果を示す。繰返し正規圧密線の外側（不可能領域）に応力状態を取る。名古屋大学では、この「嵩張り」具合を

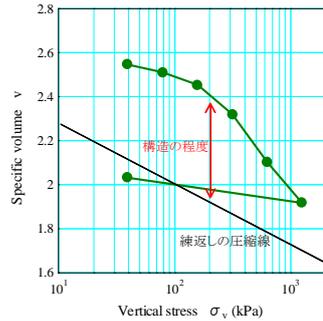


図-1 標準圧密試験結果

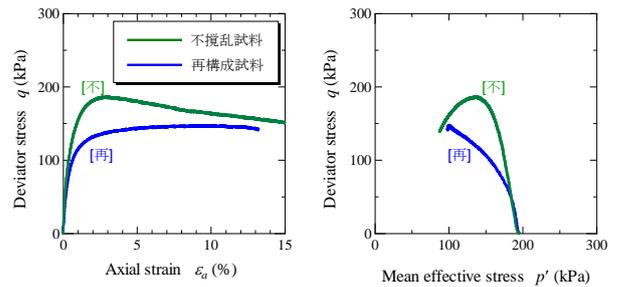


図-2 単調非排水せん断挙動

定量的に「構造」と定義しており<sup>2)</sup>、使用する粘土試料は、高位な構造を有することがわかる。鉛直応力が増加して塑性変形が進展するにつれて、構造は次第に低位化して繰返しの圧密線に漸近していく。図-2 に非排水三軸圧縮試験結果を示す。図中には、不攪乱試料を一度捏ねくり返して構造を低位化させた再構成試料の試験結果も同時に示している。再構成試料は硬化挙動のみを示すが、構造高位な不攪乱試料は塑性圧縮を伴う軟化挙動（ $p'$  減少を伴う  $q$  の減少）を示す。

### (1) 非排水繰返しせん断挙動

図-3 に、軸力制御で実施した側圧一定非排水繰返し三軸試験結果を示す。有効拘束圧は 200kPa, 繰返し応力は振幅を 98kPa (応力振幅比  $\tau/p'_0 = 0.25$ ) の正弦波形で与えて周期を 20 秒とした。なお、繰返し速度が速いため、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一だと考えられるが、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、有効応力を算出している。繰返し回数の増加とともに平均有効応力が減少するが、砂質土のように  $p' = 0$  までは減少しない。高応力下でほとんど発生しなかった軸ひずみが低応力下で次第に進展していき、最終的には供試体中央が括れて（ネッキング）破壊している。応力制御繰返し試験では、繰返しとともに  $p'$  が減少し続けているものの、供試体のネッキングが卓越して破壊してしまっている。そこで図-4 には、変位制御で実施した側圧一定非排水繰返し三軸試験結果を示す。有効拘束圧は 300kPa, 繰返し変位は振幅を 2.8mm (ひずみ振幅 3.5%) の三角波形で与えて周期を 300 秒とした。繰返しとともに  $p'$  が、過剰間隙水圧比  $u_e/p' = 0.9$  まで減少する。この時、応力ひずみ関係を見ても、繰返しとともに次第に剛性が低下している様子がうかがえる。応力制御で繰返すと供試体変形の影響が大きくなってしまいが、変位制御にすることによって供試体の変形を抑えつつ多くの繰返し载荷を与えることができた。その結果、粘性土であっても、大きな振幅でたくさんの繰返し载荷を与えることで  $p'$  が大きく減少することがわかった。

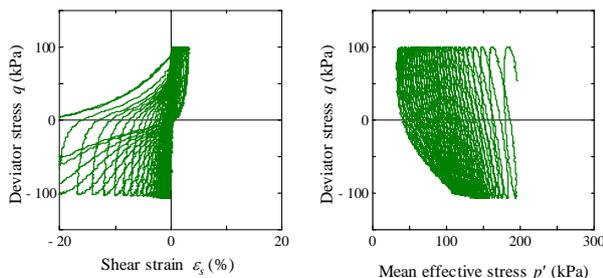


図-3 非排水繰返しせん断挙動 (応力制御)

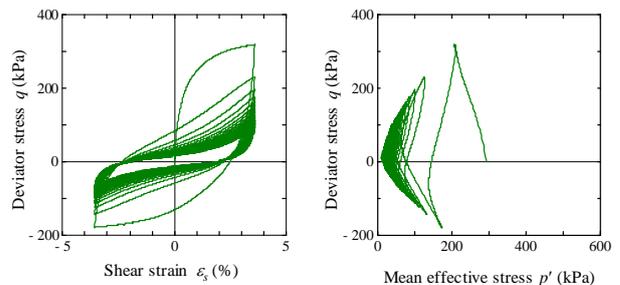


図-4 非排水繰返しせん断挙動 (変位制御)

## (2) 非排水繰返しせん断後の力学挙動（圧密とせん断）

変位制御で繰返しせん断を与えた後、繰返し载荷を止めて、そのまま排水コックを開いた時の圧密挙動を調べたところ、始点と終点から算出した再圧密線の傾き  $\Delta v/\ln \Delta p'$  は 0.055 となった。これは、別途等方除荷試験から求めた膨潤線の傾き ( $\bar{\kappa}=0.03$ ) よりも約 2 倍程度大きい。続いて図-5 には、再圧密後の単調载荷非排水三軸圧縮試験結果を繰返し履歴のないものと一緒を示す。繰返し履歴のないものは、塑性圧縮を伴う軟化挙動 ( $p'$  の減少を伴う  $q$  の減少) を示しているが、繰返し履歴を与えると軟化の程度が小さくなっている。繰返し载荷によって粘性土が乱され、構造が低位化したためだと考えられる。

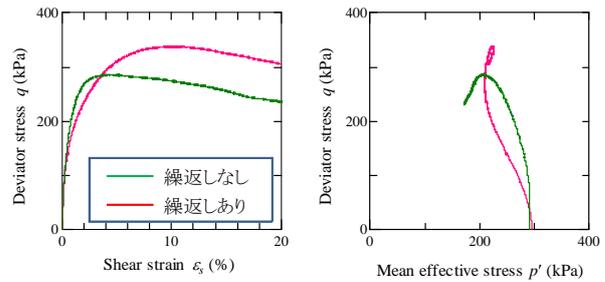


図-5 単調非排水せん断挙動の繰返し履歴有無の比較

## 3. 水～土連成動的有限変形解析結果

図-6 に解析に用いた有限要素メッシュを示す。軸対称性と上下対称性を仮定した 1/4 円柱供試体を用いて行った。有限要素メッシュは縦 32×横 14 の 448 要素で、サイズは縦 8.0cm、横 3.5cm である。供試体は境界非排水条件とし、上端部には摩擦のある剛なペデスタルを仮定するために、水平方向への変位制約を設けた。表-1 に解析に用いた弾塑性性状の一覧を示す。弾塑性パラメータは繰返し試験の力学試験結果から、発展則パラメータおよび初期値は、SYS カムクレイモデルを用いて、圧密からせん断まで各種力学挙動を一組の定数群で再現することによって決定している。初期構造の程度が大きく、鋭敏な状態であることがわかる。解析は、実験と同様に、変位振幅一定で非排水繰返しせん断を与えた後で圧密を行った。

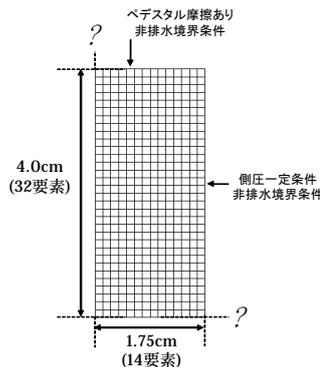


図-6 有限要素メッシュ

弾塑性	弾性	発展則	物性	初期値
弾性	弾性状態定数 M	1.50		
弾性	NCL の切片 N	2.08		
弾性	圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.15		
弾性	膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.03		
弾性	ポアソン比 $\nu$	0.1		
発展則	構造劣化の塑性尺度 (IREV)	4		
発展則	$-D_p^r$ と $\ D_p^r\ $ の割合 $c_c$	1.0		
発展則	構造劣化指数 $a$ ( $b=c=1.0$ )	0.45		
発展則	正規圧密土化指数 $m$	2.5		
発展則	回転硬化指数 $br$	0.05		
発展則	回転硬化限界面 $m_b$	1.0		
物性	土粒子密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	2.65		
物性	透水係数 $k$ (cm/s)	$1.0 \times 10^{-7}$		
初期値	初期比体積 $v_0$	2.25		
初期値	初期応力比 $\eta_0$	0.0		
初期値	初期構造の程度 $1/R'_0$	17.7		
初期値	初期過圧密比 $1/R_0$	1.2		
初期値	初期異方性の程度 $\epsilon_0$	0.0		

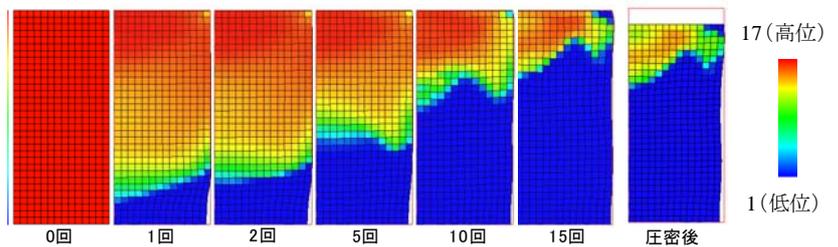


図-7 変位振幅一定繰返しせん断中の構造分布（解析結果）

図-7 に、構造の程度の分布を示す。ペデスタルによる摩擦の影響で、供試体上端における構造低位化の程度は小さいが、初期に高位であった構造が繰返しとともに、供試体中央部から次第に低位化しており、繰返し载荷によって供試体が乱されていることがうかがえる。また、繰返しせん断後の圧密変形時にも構造の低位化が進んでいることもわかる。なお、再圧密時の圧縮量は膨潤線から予測される圧縮量よりも大きく、実験結果の特徴を再現できている。図-7 を見ると、繰返し载荷中だけでなく、再圧密時にも構造は低位化しており、この構造低位化が圧縮量の増加に寄与したと考えられる。続いて図-8 には、再圧密後の単調载荷非排水せん断挙動である。繰返し履歴のないものも同時に示している。実験結果（図-5）と比べると、有効応力パスの形状こそ若干異なるが、繰返し履歴を与えることによって軟化挙動が見られなくなるといった特徴を再現している。

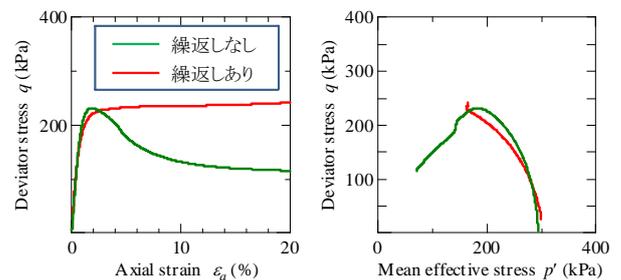


図-8 単調非排水せん断挙動（解析結果）

## 4. おわりに

本報では、鋭敏粘土の不攪乱試料を用いて変位制御非排水繰返しせん断の実験および数値解析を実施し、粘性土の動的な特性把握を試みた。その結果、繰返しせん断中の乱れ（構造の低位化）が原因となって、①せん断時の軟化の程度が小さくなること、②繰返しせん断後の圧密変形量が大きくなること、がわかった。

参考文献 1) 松井保他(1998): 粘性土の動的性質, 土と基礎—講座, Vol.46 No.6~Vol.47 No.4. 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description..., S & F, 42(5): 47-57. 3) Asaoka, A. and Noda, T. (2007): All Soils All States..., Int. Work. on Constitutive Modeling..., pp.11-27. 4) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation... S&F, 48(6), 771-790.