

繰返し载荷を受ける自然堆積粘土の力学挙動記述のための構造概念の重要性

名古屋大学 (正) ○中井健太郎、中野正樹、野田利弘、浅岡顕
(学) 野中俊宏、酒井宏和、威能洋恭、藤川雄資

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も数多く報告され、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)を考慮した弾塑性構成式(SYS カムクレイモデル⁴⁾)を提案しているが、本報では、軟弱な自然堆積粘土の非排水繰返しせん断試験結果をこの構成式の応答と対比することにより、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。なお、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が、この嵩張り具合を「構造」と呼んでいる。

2. 自然堆積粘土の非排水繰返しせん断挙動

実験に用いた試料は、三重県四日市市内で採取した沖積粘土で、採取深度は GL-12.6 ~ -13.5m である。当該粘土層は N 値が 0 ~ 4 と小さく、非常に軟弱である。物理特性を表-1 に、粒径加積曲線を図-1 に示す。できるだけ乱さないよう採取した試料を $\phi=35\text{mm}$ 、 $h=80\text{mm}$ に成形して三軸試験機にセットした後、背圧を 196kPa かけて飽和度を高めた。48 時間等方圧密した後、軸力制御で側圧一定非排水繰返し三軸圧縮 / 伸張試験を実施した。拘束圧は土被り圧と等しい 110kPa である。繰返し応力は正弦波形で与え、振幅を 70kPa、周期を 20 秒とした。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質だと考えられるが、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、有効応力を算出した。図-2 に試験結果を示す。繰返し回数は 45 回である。図-2(a)を見ると、繰返しとともに平均有効応力 p' が減少し、特に最初の繰返し時に減少量大きい。 p' は減少し続けるのではなく、 $p'=20\text{kPa}$ 付近で収束する。圧縮側と伸張側で対称的な挙動を示さず、圧縮側の方が伸張側よりも有効応力パスの勾配が大きい。図-2 を見ると、繰返しの初期段階では、軸ひずみ ε_a はほとんど生じないが、繰返し回数が増加して p' の減少が収束しだすと(低 p' 下では)、次第に ε_a が圧縮側、伸張側両方向へ進展していく。このとき、圧縮側に比して伸張側の方が ε_a の発生量大きい。ここでは省略するが、さらに繰返し载荷を加えると、伸張側で ε_a が急増して脆性破壊を生じた。

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

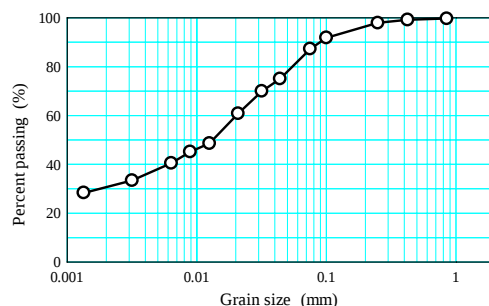


図-1 粒径加積曲線

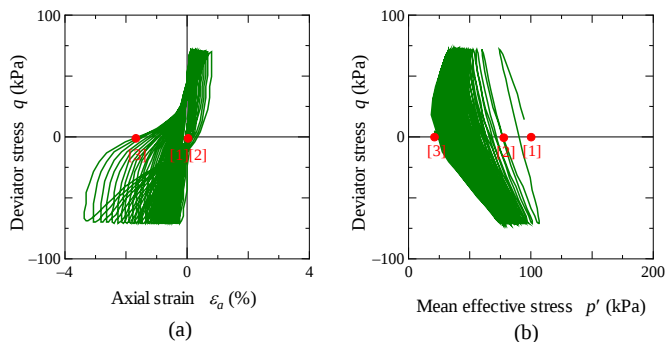


図-2 非排水繰返しせん断試験結果

自然堆積粘土、構造、繰返しせん断、非排水せん断

〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 052-789-3834, FAX 052-789-3836

3. 繰返し載荷履歴を受けた粘土の非排水せん断挙動

続いて、非排水繰返し載荷中に任意の繰返し回数で繰返しを止め、排水コックを閉じたまま十分時間を置いた後、軸ひずみ速度一定条件のもと(0.007mm/min)、非排水三軸圧縮試験を実施した。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。図-3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、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、 ε_a が4%程度伸張側で発生した試験結果(図-2参照)である。図-3(c)を見ると、[1]→[3]の順に、繰返し載荷中に蓄積した過剰間隙水圧が大きくなっている。図-3(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-3(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た。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。

4. 繰返し載荷中の構造低位化過程の記述

図-4 は SYS カムクレイモデルによる再現例である。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、そのまま単調非排水せん断した。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。表-2 には、単調非排水せん断前の骨格構造の値を示す。計算結果を見ると、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。また、表-2 から有効応力が小さいほど、構造が低位化しており、繰返し載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。

5. おわりに

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表現でき、両者の違いは単位塑性変形当たりの骨格構造の変化の仕方の違いとして記述される。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、繰返し載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になる。自然堆積地盤の動的挙動の把握のためには、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。

参考文献 1)Sasaki, Y., Moriawaki, 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 Auvemet, 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 mechanism of soils, S&F, Vol.42, No.5, pp.47-57.

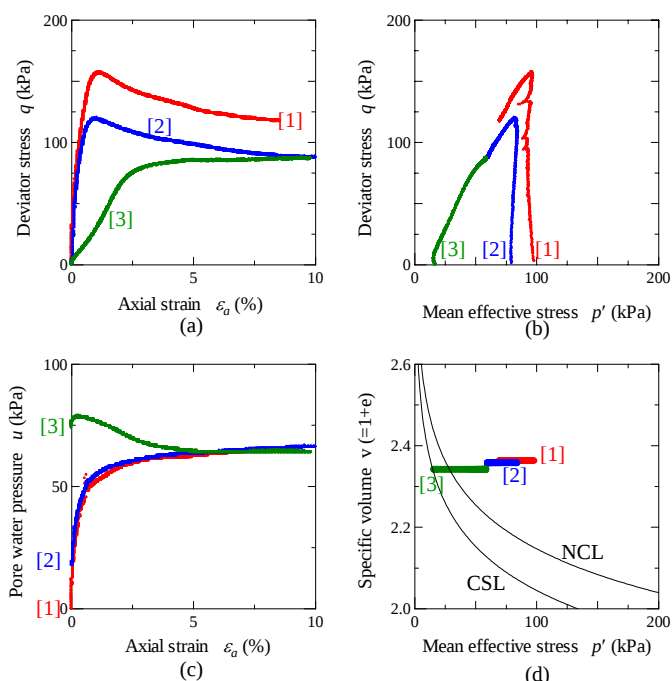


図-3 繰返し履歴の異なる粘土の非排水せん断挙動

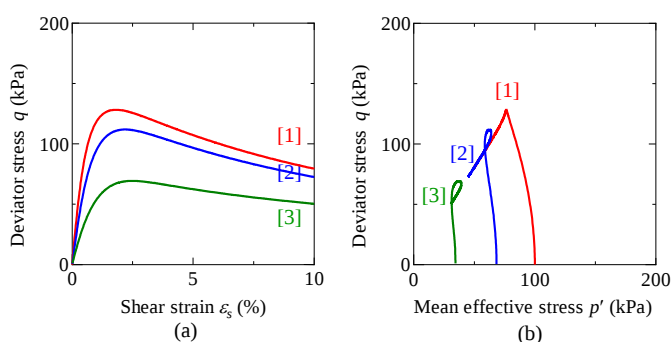


図-4 SYS カムクレイモデルによる再現結果

表-2 単調非排水せん断前の骨格構造の程度

	[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