

繰返し載荷による軟弱粘土の乱れの把握と骨格構造概念に基づく記述

名古屋大学 正会員 ○中井健太郎
 名古屋大学 フェロー会員 野田利弘
 名古屋大学 学生員 鈴木彩華, 水上孔太

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が注目されることが多いが、メチオカン地震(1895)やトルコ地震(1999)など、軟弱粘土地盤が関与したと考えられる地震中～地震後被害も数多く報告され¹⁾、近年研究も鋭意進められてきている。しかし、粘土地盤の実務・研究の多く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には十分と言えない。名古屋大学では土の骨格構造(構造、過圧密、異方性)とその働きを記述した弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル²⁾)を提案している。本報では、繰返し載荷による軟弱粘土の乱れの影響を非排水三軸圧縮試験結果から把握するとともに、上記構成式の応答と対比することで、軟弱粘土の動的挙動の把握には構造概念が重要であることを示す。

2. 繰返し載荷履歴がない場合

実験に用いた粘土試料の粒径加積曲線を図1に、物理特性を表1に示す。液性指数 I_L は0.96と高くて高含水比状態にある。また、同一層内の土試料の鋭敏比 S_r は15.1～24.8、圧縮指数比 C_c/C_{cr} は1.87～2.42とともに大きく、盛土施工時等に長期沈下を引き起こす危険性が高い、鋭敏で軟弱な粘土と言える³⁾。図2に標準圧密試験結果を示す。不攪乱試料は、繰返し圧縮線に対して嵩張った(同鉛直応力で比較すると大きな間隙比を有する)挙動を示すことから構造²⁾を有するとともに、圧密段階が進み、塑性変形が進展すると構造が低位化し、繰返し圧縮線に近づいていくことがわかる。

図3に非排水三軸圧縮試験結果を示す。軸ひずみ速度は0.0075%/min、拘束圧は45, 100, 170kPaである。いずれの供試体も土被り圧相当の170kPaで等方圧密した後、所定の応力まで等方除荷した。すべての拘束圧で軟弱粘土に特徴的なひずみ軟化挙動を示す。ピーク強度に目を向けると、拘束圧が大きいほど若干大きい、大差はない。いずれの供試体も土被り圧を超える応力履歴を受けておらず、せん断前の体積変化が小さい(せん断前比体積がほぼ等しい)ためである。

3. 繰返し載荷履歴がある場合

図4は拘束圧170kPaのもとで実施した不攪乱試料の非排水繰返しせん断試験結果である。供試体の局所的な変形を防ぎ、多数回の繰返し載荷履歴を与えることができるように、軸ひずみ振幅一定・変位制御で繰返し載荷を与えている。軸ひずみ振幅は1.2%、軸ひ

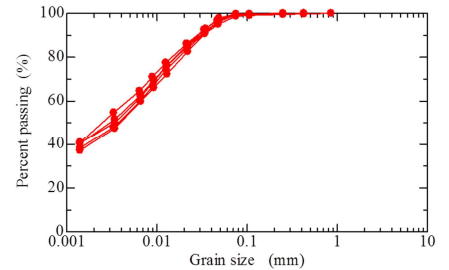


図1 粒径加積曲線

表1 物理特性

密度 ρ_s (g/cm ³)	2.70
液性限界 w_L (%)	70.6
塑性限界 w_p (%)	30.0
塑性指数 I_p	40.6
自然含水比 w_n (%)	67.6
液性指数 I_L	0.96

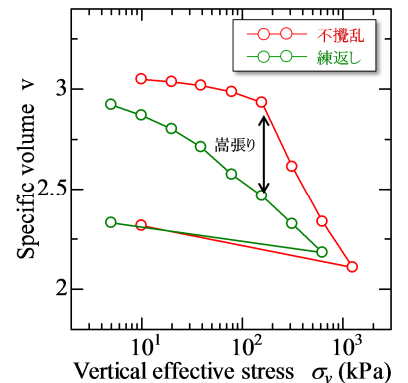


図2 標準圧密試験

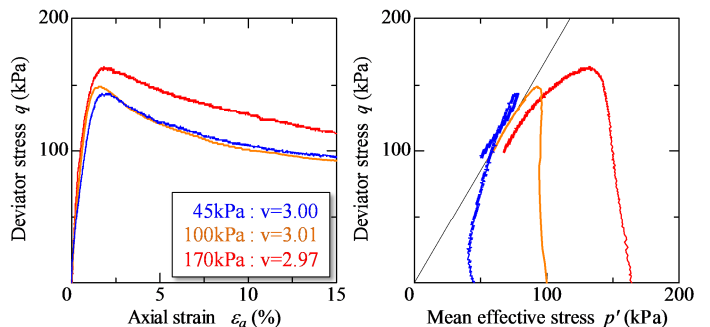


図3 非排水せん断挙動(繰返しせん断履歴なし)

軟弱粘土、鋭敏比、繰返しせん断、土の乱れ、構造

ずみ速度は 14.4%/min である。繰返しとともに剛性の低下と平均有効応力の減少が観察される。繰返し载荷の影響を把握するために、図 3 と同じ平均有効応力で繰返し载荷を止め、非排水状態のまま単調载荷せん断試験を実施した。なお、繰返し载荷速度が速いため、間隙水のマイグレーションの影響がなくなるまで非排水状態のまま放置してからせん断している。

図 5 に非排水三軸圧縮試験結果を示す。载荷条件は図 3 と同じである。繰返し载荷履歴を受けた供試体は依然としてひずみ軟化挙動を示すものの、繰返し履歴の増加とともに、①初期剛性の低下、②ピーク強度の低下、③軟化の程度の減少、といった特徴が見られる。このことは、非排水繰返しせん断履歴によって土が乱されたことを意味している。

4. 骨格構造概念に基づく粘性土の乱れの記述

図 6, 7 に SYS カムクレイモデルによる再現結果を示す。10kPa の低拘束圧を

共通の初期値とし、各実験で実際に与えた応力履歴を与えることで非排水せん断挙動を再現している。つまり、図 6 は等方圧密／等方除荷応力を変えることによって、図 7 は 170kPa で等方圧密した後の非排水繰返しせん断履歴を変えることによって再現しているが（紙面の都合上、繰返し挙動は省略）、繰返し履歴によってピーク強度が低下することなど、実験結果の特徴をよく捉えている。図中には、せん断中の構造

の変化も載せているが、図 7 においては、繰返し载荷によって拘束圧が小さくなるほど初期構造の程度が小さくなっており、繰返し载荷に伴う土の乱れは構造低位化として記述される。

今後は、構造の低位な再構成試料や物理特性の異なる自然堆積粘土との比較を通じて、（塑性変形に伴う）骨格構造変化のしやすさの違いを把握するとともに、繰返し载荷に伴う土の乱れが、地震中～地震後の地盤変状に及ぼす影響を数値解析的に検討していく。

参考文献 1) 粘性土の動的性質: 土と基礎, 1998 年 5 月～1999 年 4 月. 2) Inagaki, M. et al. (2010): Proposal of a simple method for assessing..., S&F, 50(1), 109-122. 3) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume..., S&F, 42(5), 47-57.

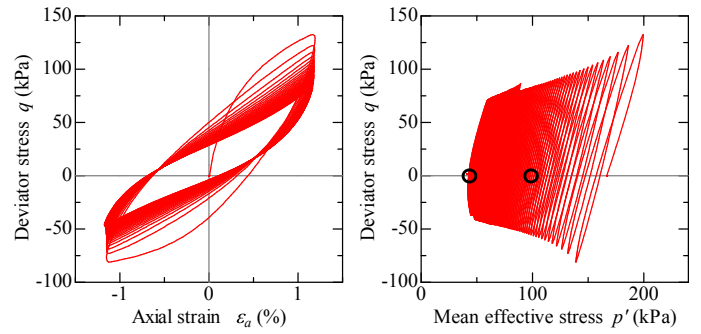


図 4 非排水繰返しせん断挙動

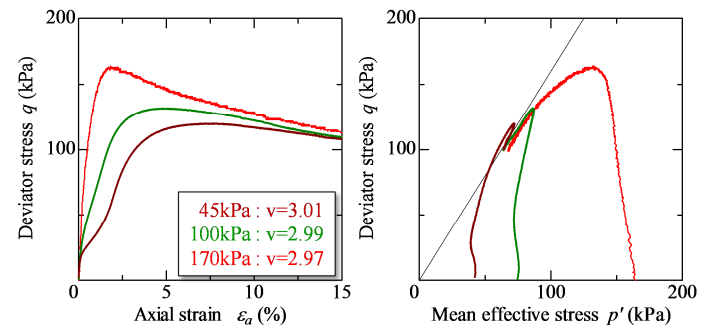


図 5 非排水せん断挙動（繰返しせん断履歴あり）

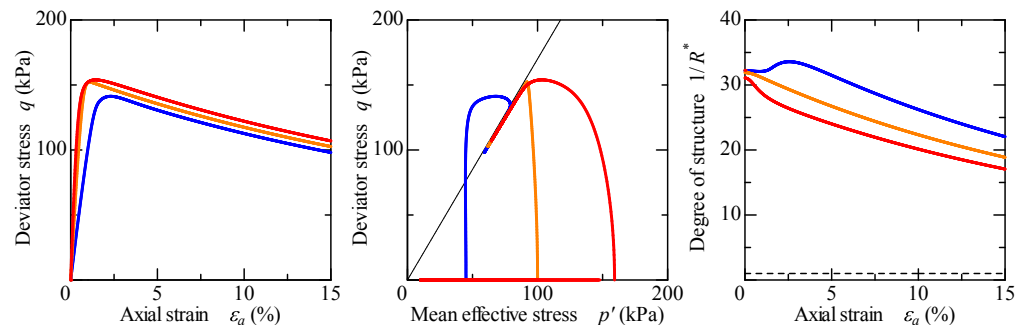


図 6 SYS カムクレイモデルによる再現（繰返しせん断履歴なし）

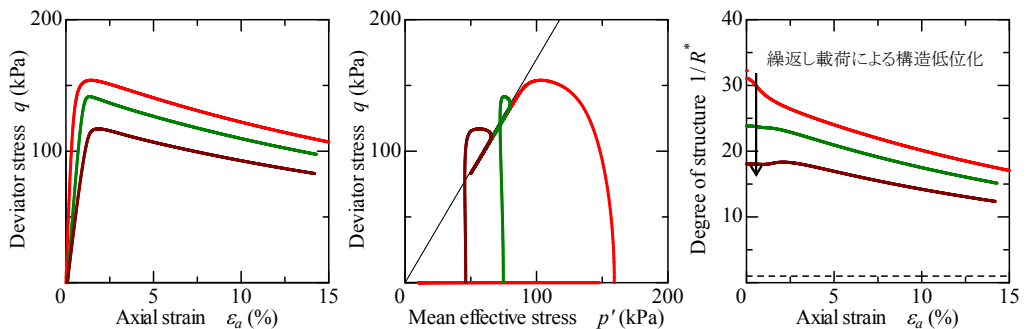


図 7 SYS カムクレイモデルによる再現（繰返しせん断履歴あり）