

砂と粘土の繰り返し非排水せん断挙動の違いに関する一考察

九州大学大学院 (フェロ-) 落合 英俊 (正) 安福 規之
(学) ○幸 聖二 (正) 山田正太郎

1. はじめに

砂も粘土も粒子の集合体であることには変わらない。しかし、その力学特性は全く異なっている。我々が感覚的にそのことを理解していることは、せん断剛性の著しい低下を、砂では「液状化」、粘土では「乱れ」と呼び分けていることから分かる。そこで本研究では、自動制御した三軸試験機を用いて、砂と粘土の繰り返し非排水せん断試験を行い、力学的挙動の特徴について考察を行った。

2. 実験概要

6号硅砂と佐賀県小城郡芦刈町の蓮池層より採取した不攪乱状態の有明粘土に対して繰り返し非排水せん断試験を行った。砂の供試体サイズは高さ $H_0=10.0$ [cm], 直径 $D_0=5.0$ [cm] であり、水中落下法により作成した。相対密度は 60 [%] である。粘土の供試体サイズは $H_0=7.0$ [cm], $D_0=3.5$ [cm] であり、自然含水比はおおよそ 150 [%] である。

砂に対しては 200 [kPa], 粘土に対しては 50.0 [kPa] の等方圧密を行った後に、繰り返し非排水せん断試験を行った。粘土に関しては圧密により不攪乱粘土が有している構造が完全に壊れないように、測定・制御が可能な範囲で拘束圧を小さくした。繰り返し方法については応力振幅一定とし、拘束圧と同じ大きさの振幅を与えた。両者とも、せん断速度は軸ひずみ速度 ± 1.0 [%/min] とした。また、粘土については軸ひずみの振幅を一定 ($\varepsilon_a = \pm 10.0$ [%]) とするような試験も行った。

3. 実験結果および考察

3-1. 砂と粘土の繰り返し非排水せん断挙動

図 3-1-1, 3-1-2 は、砂と粘土の応力振幅一定条件下での繰り返し非排水せん断時の応答を示している。

同じ条件下の試験であっても、両者は大きく異なる挙動を示している。砂は、はじめ粘土に比べて剛性が大きいものの、有効応力経路が限界状態線付近まで到達すると、急激に剛性を低下させ、各サイクルで平均有効応力 $p'=0$ [kPa] で、かつせん断応力 q が増加しない状態に至る (液状化)。一方、粘土の剛性の低下は砂とは対照的に緩やかに起こり、低下の程度も砂には到底及ばない。過剰間隙水圧は蓄積されるものの、かなりの繰り返し回数を重ねても、平均有効応力が 0 になるほどではない。また、砂は液状化後もせん断を続けると限界状態線の上側で、顕著な硬化挙動を示すが、これは粘土には見られない特質すべき挙動であると言える。

3-2. 粘土の「乱れ」と骨格構造

自然堆積粘土の中には、液性限界を超えるほどに高含水比のものもあるが、そのような粘土を手で練り返すと、すぐに泥土化する。今回、試験に用いている不攪乱状態の有明粘土もまたそのような性質を有しているが、先のせん断試験後の供試体は感覚的に泥土化しているというほどの状態にはかった。そこで、次に繰り返しせん断方法を変え、軸ひずみの振幅が一定となるように繰り返しせん断試験を行ってみた。図 3-2-1 はその結果

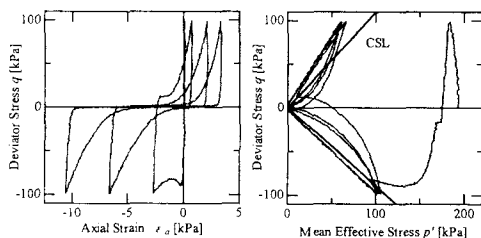


図 3-1-1. 砂の非排水せん断挙動 (応力振幅一定)

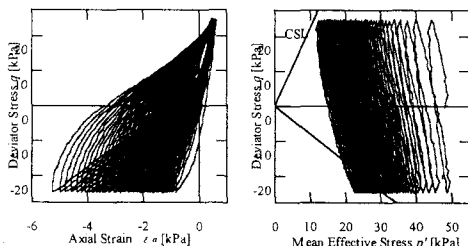


図 3-1-2. 粘土の非排水せん断挙動 (応力振幅一定)

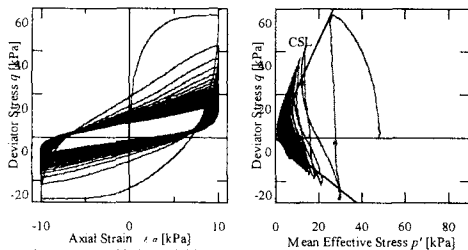


図 3-2-1. 粘土の非排水せん断挙動 (ひずみ振幅一定)

である。繰り返し回数を増す毎に徐々に剛性が低下していくという特徴に変わりはないが、応力振幅一定で繰り返しせん断を行った時とは異なり、次第に $p'-q$ 平面上で原点へと接近してゆき、ほぼ平均有効応力がゼロに近い状態に至る。また、その時のせん断剛性はきわめて低い。なお、砂が液状化後に示するような顕著な硬化挙動は見られない。

今回の試験では、粘土は、ひずみ振幅一定条件下においてよく乱すことが出来たと言えるが、その理由について、浅岡ら³⁾が提案する上下負荷面カムクレイモデルを用いた数値解析を行うことで考察する。このモデルは、土の「骨格構造」を構造と過圧密という概念で捉え、それらの変化を記述した弾塑性モデルである。構造とは不攪乱粘土試料やゆるい砂のような高張りを概念化したものである。モデルの詳細は文献⁴⁾に譲る。解析に用いたパラメータは基本的には文献²⁾と同じである(限界状態線の傾き M のみ 2.2 に変えた)。粘土は構造が喪失する速度に比べて、過圧密が解消する速度が速いことが報告されている³⁾が、パラメータはそれを考慮した値になっている。

図 3-2-2 に応力振幅一定条件下での応答 (図 3-1-1 に対応)、図 3-2-3 にひずみ振幅一定条件下での応答 (図 3-1-2 に対応)を示す。図中において、 $R^* \cdot R$ は、その逆数が構造・過圧密の程度を示し、両者の値が 1 の場合は繰り返し正規圧密状態にあることを示す。ここでは、初期値は構造の十分に発達した正規圧密状態にある粘土を想定して与えた ($R^*_0=0.1$, $R_0=1.0$)。解析結果は、図 3-2-2、3-2-3 共に傾向をよく捉えている。応力振幅一定条件下では繰り返す毎に過圧密土化していく ($R \rightarrow 0$) のに対して、構造はほとんど変化しない。ひずみ振幅一定条件下では、過圧密は増減を繰り返す一方で、構造は徐々に喪失していく ($R^* \rightarrow 1$)。粘土は、ほぼ過圧密が解消してから構造が顕著に喪失し始めるが、応力振幅一定試験は過圧密が蓄積しやすいせん断方法であるため、構造の喪失すなわち乱れが起きにくかったと言える。

4. まとめ

砂と粘土の繰り返し非排水せん断挙動について調べた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断回数の増加に伴い粘土は徐々に剛性を失っていくのに対し、砂は急激に液状化に至ると言える。
- (2) 砂は液状化後もせん断を続けると、限界状態線の上側で硬化するが、粘土ではそのような挙動は顕著には見られない。
- (3) 粘土はせん断の与え方次第で、乱れ方が大きく異なることが分かったが、このことは粘土の「構造喪失速度は、過圧密解消速度に比べて極めて遅い」という性質の端的な現れであると言える。

【参考文献】 1) Asaoka, A. Nakano, M. & Noda, T. "Superloading Yield Surface Concept for Highly Structured soil Behavior", S&F, 40-2:99-110 (2000a). 2) 幸, 山田ら「自然堆積粘土の繰り返し粘土のせん断挙動の違いに関する基礎的研究」土木学会西部支部研究発表会 (2003) A238-239. 3) 浅岡ら「自然堆積粘土の構造低位以下と鋭敏比・乱れの関係について」第 34 回地盤工学研究発表会概要集, 561-562 (1999)

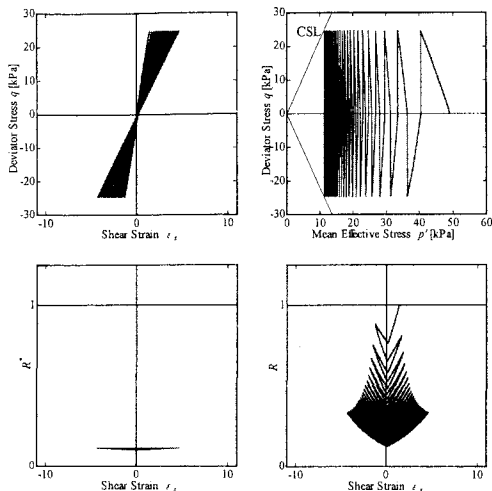


図 3-2-2. 粘土の非排水せん断の計算値 (応力振幅一定)

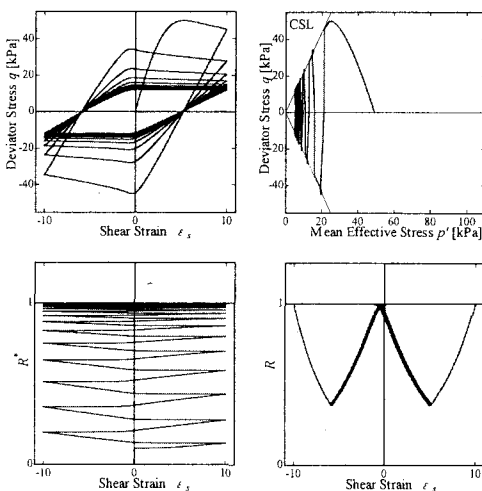


図 3-2-2. 粘土の非排水せん断の計算値 (ひずみ振幅一定)