

異方応力条件下の粘土の繰返し載荷時の即時変形とその後の圧密変形

単純せん断試験，変形挙動，鋭敏粘土

名城大学 国際会員 小高猛司・崔 瑛

名城大学大学院 学生会員 ○大野雄貴

オリエンタルコンサルタンツ 正会員 吉田賢史

(元名城大院)

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震において，粘性土地盤上の河川堤防が液状化によって大変状するという被害が発生した。しかし，その変状メカニズムの検証にあたっては，それら粘性土地盤が果たした役割についてはほとんど注目されていない。粘土地盤では，地震時の繰返し載荷により即時的に沈下することや，地震時に累積した過剰間隙水圧が，地震後に消散するのに伴って時間をかけて圧密沈下すると考えられる。さらに，骨格構造が高位な粘土地盤の場合には，地震時ならびに地震後の構造劣化の影響も把握しておかなければならない。そこで本報では，長時間にわたり繰返し地震動が作用する場合の，粘性土地盤の地震動の大きさの違いによる地震時ならびに地震後の変形挙動について着目し，室内試験を行った。具体的には，不攪乱自然堆積粘土を用いて，単純せん断試験装置により，非排水条件での繰返しせん断をした後，その際発生した過剰間隙水圧が消散するまで圧密を実施し，排水量ならびに軸圧縮量を計測した。

2. 試験概要

本報で用いた試験試料は，不攪乱の自然堆積粘土（以下，不攪乱赤井粘土）である。不攪乱赤井粘土は，大阪府大東市赤井で採取した Ma13 沖積粘土であり，大阪平野における内湾部の汽水環境で堆積しており鋭敏性が高い¹⁾。図 1 に赤井粘土の三軸試験結果²⁾を示す。不攪乱粘土では，塑性圧縮を伴うひずみ軟化挙動が顕著に現れており，構造が卓越した鋭敏な粘土であることがわかる。供試体寸法は，直径 60mm，高さ 30mm の円柱形である。単純せん断試験装置では，上下ペDESTAL に刃付きのポーラスストーンを設置しており，供試体との摩擦を十分に確保したうえで，上部ペDESTAL を水平移動させることにより単純せん断試験を行う。また，メンブレンを被せた供試体の外側に，供試体径と同じ内径の（a）応力～ひずみ関係 （b）有効応力経路

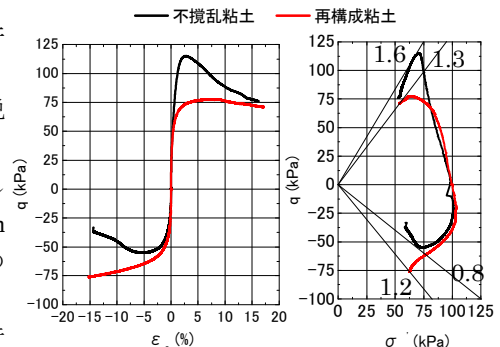


図 1 赤井粘土の三軸試験結果

穴を持つ厚さ 1mm のドーナツ形状の多層スリップリングを 30 枚積層させて設置し，供試体側面形状を拘束しながらせん断することで，単純せん断モードを維持している。供試体をセルに設置後，二重負圧法によって飽和化を行い，背圧を 200kPa 作用させ，20 時間圧密後，非排水条件で繰返しせん断試験を実施した。繰返しせん断は，せん断ひずみ片振幅を 3% に設定して約 3 時間（8 回），1% に設定して約 48 時間（300～360 回）繰返しせん断試験を実施することで，地震動の大きさの違いを模擬して比較した。なお，繰返しせん断時の載荷速度は全試験 Case とともに 0.5%/min である。

3. 試験結果

表 1 に各試験 Case のせん断前の圧密条件を示す。Case A は，せん断ひずみ片振幅を 3% に設定しており，Case B～G には，せん断ひずみ片振幅を 1% に設定している。Case B および Case E は等方圧密条件であり，Case A, C, D, F, G は原地盤を意識した異方圧密条件とした。また，Case B と D は有効土被り圧の原地盤応力相当の応力であり，Case A, C, F, G は盛土築造などを想定して降伏応力を超えた応力に設定した。また，Case G は異方応力状態の違いによる力学特性を把握するために， K_0 値を変えて試験を実施した。図 2 に Case A の繰返しせん断結果を示す。有効応力経路を見ると，1 波目の載荷で有効応力が大きく減少し，2 波目以降は減少・回復を繰返ししながら，有効応力は徐々に低下していく。

表 1 各試験 Case の圧密条件

Case	深度	土被り圧	K_0	σ'_1	σ'_3	σ'_m
A	7.8m	56kPa	0.5	90kPa	45kPa	60kPa
B	7.7m	55kPa	1.0	60kPa	60kPa	60kPa
C			0.5	90kPa	45kPa	60kPa
D	7.8m	56kPa	0.5	60kPa	30kPa	40kPa
E	7.9m			90kPa	90kPa	90kPa
F	8.0m	57kPa	0.5	120kPa	60kPa	80kPa
G			0.67	90kPa	60kPa	70kPa

図 3 に Case C の繰返し載荷試験結果を示す。有効応力経路を見ると，せん断ひずみ片振幅 3% の試験結果と同様に 1 波目の載荷で有効応力が大きく減少し，2 波目以降は減少・回復を繰返ししながら有効応力は徐々に低下していく。またせん断応力は，せん断ひずみ片振幅 3% の結果より小さい値となった。

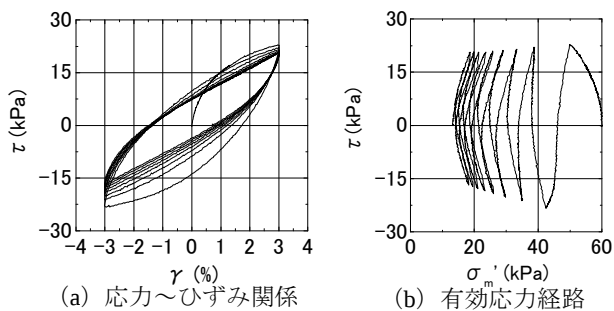


図2 Case A の繰返しせん断試験結果

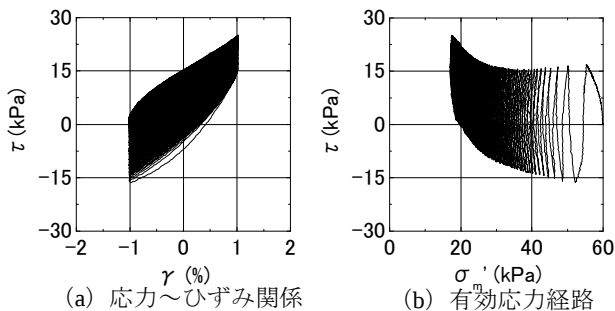


図3 Case C の繰返しせん断試験結果

図4に繰返しせん断時の軸ひずみの変化を示す。Case Aを見ると、せん断が進むにつれ、軸ひずみが増加していることが分かる。また軸ひずみは2%弱となっている。また、Case B~Gを見ると、等方圧密で実施したCase Bでは、軸ひずみはほとんど発生していないが、異方圧密のCase C,D,F,Gでは軸ひずみが発生している。特に、鉛直荷重を土被り圧より大きく作用させたCase Fでは、3%ほどの軸ひずみが発生しており、地震時の揺すり込み沈下が示唆される。Case Aと比較すると、せん断ひずみ片振幅が大きいほど繰返しせん断中の軸ひずみ量は大きくなっている。

図5に繰返しせん断後の圧密時の体積ひずみと軸ひずみを示す。Case Cは他のCaseに比べて体積ひずみが大きく発生している。Case A, D, Gでは、試験後半に体積ひずみが減少・増大を繰り返しているが、軸変位には異常が認められないことから、何らかの要因により差圧計の電圧が不安定になったためと考えており、今後改善が必要である。軸ひずみはCase CならびにCase Dでは、体積ひずみの1/2程度、Case Gは体積ひずみと同程度発生しており、異方応力状態を反映して軸圧縮が大きい変形となっている。また、全試験Caseとも、軸ひずみは収束せずに継続的に沈下している。

図6に一連の試験に伴う間隙比の変化を示す。図には不攪乱試料の圧縮曲線と同じ試料を繰返して作製した再構成粘土の圧縮曲線も示しているが、一連の試験を通して間隙比は繰返し粘土の圧縮曲線に到達するほどの変化はしておらず、構造の劣化度合いはそれほど大きくないと考えられる。

4. まとめ

本実験の結果より、盛土荷重などの異方応力状態にある粘性土地盤においては、せん断ひずみ片振幅が小さい場合でも、継続時間の長い地震において3%程の即時沈下が発生する可能性があることが示唆された。また、繰返し載荷時に発生する過剰間隙水圧の消散に伴って、繰返し後に体積ひずみ、すなわち圧密沈下が発生することが示された。さらに、その体積ひずみが収束しても軸ひずみの増加は継続していることから、骨格構造が劣化した粘土地盤においては地震後の継続的な圧密沈下のみならず、せん断変形も継続することが示唆された。

参考文献: 1) 大島ら：東大阪地域の鋭敏粘土層の分布域と堆積環境から見たその成因の再検討，材料，59 (1)，pp.2-7，2010. 2) 吉田ら：構造と異方性による粘土の力学挙動に及ぼす影響，平成23年度土木学会中部支部研究発表会論文集，2011.

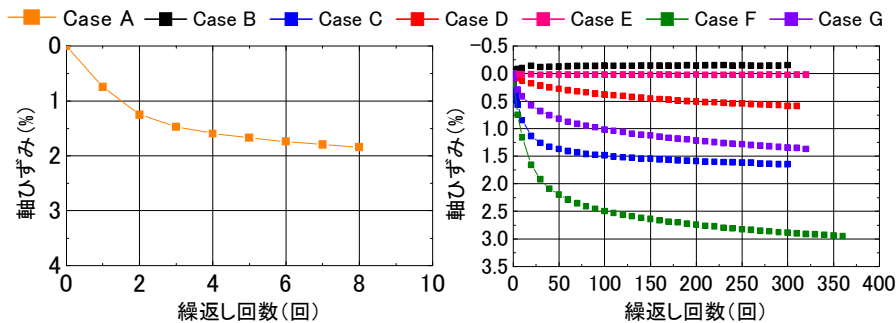


図4 繰返しせん断時の軸ひずみ変化

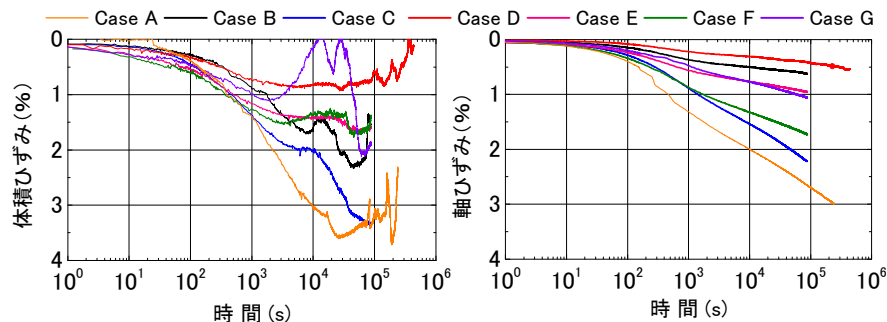


図5 繰返しせん断後の体積ひずみ・軸ひずみ量

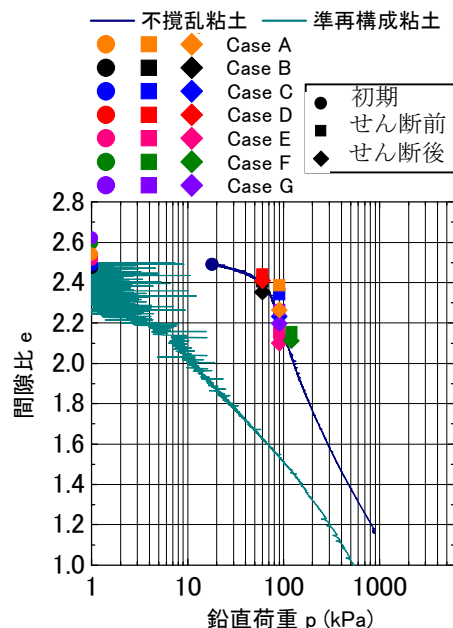


図6 一連の試験に伴う間隙比の変化