

変位制御繰返し三軸試験装置による繰返し変形特性試験の検討

Study on Cyclic Shear Deformation by Speed Controlled Cyclic Triaxial Apparatus

中村公一	Koichi NAKAMURA	(鳥取大学大学院工学研究科)
中谷真弥	Shinya NAKATANI	(元鳥取大学大学院工学研究科)
山本諭史	Satoshi YAMAMOTO	(鳥取大学大学院工学研究科)
清水正喜	Masayoshi SHIMIZU	(鳥取大学大学院工学研究科)

地震応答解析など地盤の動的問題に対する数値解析に必要な「比較的小さいひずみレベルにおける繰返し载荷のもとでの地盤材料の変形特性」を求めるとして、JGS 0542—2009「地盤材料の変形特性を求めるときの繰返し三軸試験方法」が標準化されている。標準化されている試験方法では、载荷方法として応力制御と変位制御、振幅の与え方として応力振幅一定と軸ひずみ振幅一定の方式どちらの方式を用いてもよいが、一般的には応力振幅および周波数一定の応力制御方式が行われている。本研究では、軸ひずみ振幅および軸ひずみ速度一定の変位制御方式により試験を実施し、この方式による試験結果の解釈について検討を行った。

キーワード：繰返し変形特性、変位制御、軸ひずみ振幅一定 (IGC : D-7, D-6)

1. はじめに

地盤の動的問題において、地震時における土構造物の振動や地盤の液状化現象等に関しては、土の破壊以前の変形特性や静的な破壊応力に比べはるかに小さい応力が繰返し加えられた時の動的特性が問題となる。地盤の地震応答解析には様々な解析法が存在するが、せん断剛性とせん断ひずみ ($G/G_0 - \gamma$)、減衰特性とせん断ひずみ ($h - \gamma$) の非線形な各々の関係を等価な線形関係に置きかえる手法(等価線形化法)が最も用いられている。応力とひずみ関係に依存した土の動的変形特性を時々刻々追跡しながら行う手法(逐次計算手法)がある。逐次計算手法は、等価線形化法に比べてより高度な解析手法で、扱いにくい、解析に用いる土の動力学モデルおよび土の動的変形特性が十分にモデル化できていれば、最も有効な解析法である。この様な背景のもと、これらの様々な解析モデルに適用可能な試験結果を提供することが必要であるが、現在行われている土の力学特性を求めるときの繰返し試験では、入力地震動が大きくなり著しい非線形性を示すような挙動に対して十分なデータを提供しているとはいえないのではないか、と問われている¹⁾。土の変形特性を求めるときの繰返し試験が標準化されているが、一般的に用いられている方法は、油圧等を用いた応力制御試験装置を用いて応力振幅一定の正弦波繰返し载荷をすることにより、繰返し変形特性を求めている。しかし、繰返し载荷方法として応力制御による応力振幅一定試験よりも、変位制御による軸ひずみ

み振幅および軸ひずみ速度一定試験の方が以下の点で優れているのではないかと指摘されている^{1), 3)}。1つめは、一般に地盤材料のヤング率はひずみ速度に依存すると考えられている点である²⁾。このために载荷周波数一定の正弦波荷重を用いた荷重制御試験では、1周期の間でひずみ速度が一定でなく、ピーク応力近くでひずみ速度は小さくなる。このため、とりわけ、軟弱粘性土において、ひずみレベルが大きいと供試体にクリープ変形が生じ、ひずみ速度一定の変位制御よりも履歴減衰率の値が大きくなる。2つめは、応力振幅一定繰返し载荷では伸張状態で先に破壊に至ることが多いため、大ひずみまでの試験ができない場合が多いということである。したがって、現在要求されている、数%レベルになるようなひずみ領域での実験値がほとんど無い。3つめは、所定のひずみレベルの試験を容易に実施できる点である。しかし、従来の変位制御载荷装置は、微小ひずみ領域で载荷方向の反転時に速度が不連続になり、厳密な軸ひずみ速度一定試験の実施は難しい。また、ひずみ振幅一定繰返し試験の報告はいくつかみられるが⁴⁾⁻⁶⁾、軸ひずみ速度一定かつ軸ひずみ振幅制御による試験はほとんどなされていない。

そこで本研究では、変位制御载荷装置を用いて繰返し変形特性を求めるときの繰返し三軸試験を実施し、主に振幅条件が変形特性に与える影響について検討を行い、問題点について検討を行った。

2. 試験装置, 試料, 供試体作製方法

本研究では、変位制御型三軸試験装置と応力制御型三軸試験装置の2種類の試験装置を用いた。図-1に、本研究で主に用いた変位制御型試験装置の概略図を示す。供試体サイズは直径10cm、高さ20cmであり、以後、中型供試体と略す。鉛直荷重の荷重には、パルスモータを用いているため、バックラッシュがない。したがって、荷重方向の反転時に時間がかかることなく、試験結果への影響は少ないようにしている。軸変位測定にベティンゲラーなどが影響することを防ぐため、三軸室内にギャップセンサーを設置し、供試体の軸方向局所変位量を測定した。ターゲットは、キャップ端面より20mmの位置に設置した。荷重計は容量2kNのものを用いた。応力制御型三軸試験装置は、油圧により荷重を行う試験装置であり、「土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験」(JGS0541-2009)に用いているものである。そのため、上述の変位制御型三軸試験装置と同様に、軸方向局所変位量を測定できるように、三軸室内にギャップセンサーを設置した。供試体サイズは直径5cm、高さ10cmであり、以後小型供試体と略す。応力制御型三軸試験装置では、試験装置の制約上供試体サイズの変更が不可能であったため、上述のサイズで検討を行った。

試験に用いた試料は、豊浦砂である。物理的性質を表-1に示す。供試体作製・設置は「土の三軸試験の供試体作製・設置方法」(JGS0520-2009)に従った。供試体作製方法は空中落下法により作製した。具体的には、小型供試体では5層、中型供試体では10層に分けてモールド内に投入し、相対密度の調整は落下高さを変えることで行った。本研究では、相対密度60%を密、相対密度30%を緩として整理を行った。

試験手順は、上記の方法により供試体を作製後、二重負圧法により飽和し、40kPaにて予圧密を行った後、供試体寸法を測定した。その後、背圧を負荷し、圧密を行った後、各せん断試験を行った。

表-1 豊浦砂の物理的性質

ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	D_{max}	U_c
2.646	0.993	0.594	0.850	1.857

表-2 非排水三軸試験の試験条件

p' (kPa)	100		200	
e (中型)	0.876	0.754	0.877	0.762
e (小型)	0.873	0.741	0.875	0.747

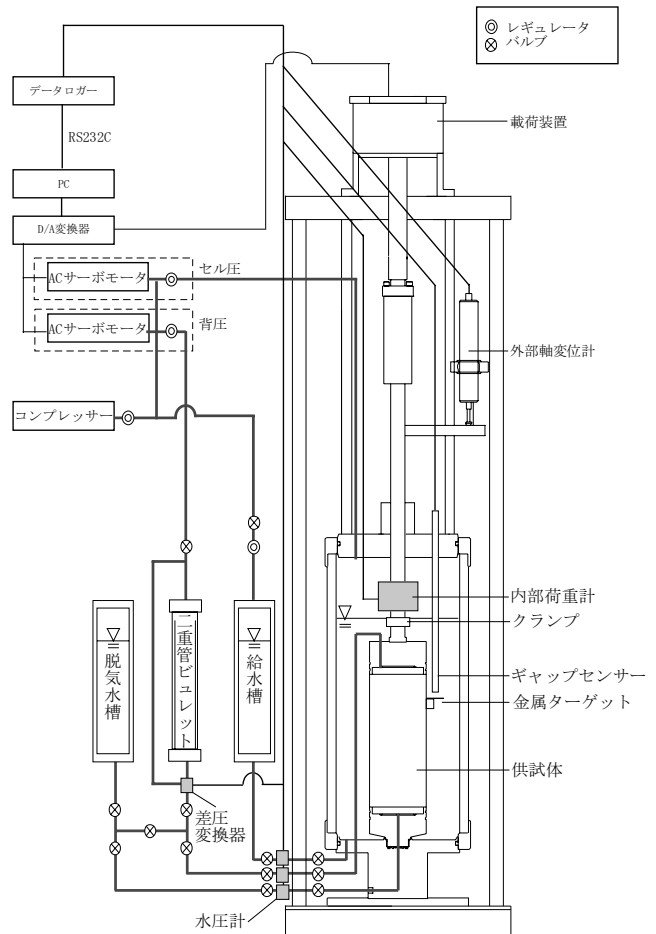


図-1 変位制御型三軸試験装置

3. 単調荷重非排水三軸圧縮試験

変位制御型三軸試験装置と応力制御型三軸試験装置の供試体サイズが異なることによる結果の影響の確認と、非排水繰返し荷重時のヒステリシスループに対する骨格曲線のデータとするため、単調荷重非排水三軸圧縮試験を実施した。試験条件を表-2に示す。せん断速度を1.0%/minとし、せん断は地盤工学会標準「土の圧密非排水三軸圧縮試験方法」(JGS0523-2009)に従った。図-2に軸ひずみ-せん断応力比関係、図-3に有効応力経路を示す。ここで応力比は

$$r = (\sigma_a - \sigma_r) / (\sigma'_a + \sigma'_r) \quad (1)$$

で定義した。図-2より供試体サイズに依らず、せん断挙動は変わらないことがわかる。密詰めでは最大応力比に達したあと低下する挙動となり、緩詰めでは $e_a=10\%$ でも最大応力比に達しない挙動となっている。ただし小型供試体では、同じ軸ひずみにおけるせん断応力比に着目すると、中型供試体の結果よりも差をもったものになっている。これは、せん断開始時の間隙比が影響していると考えられ、表-2に示すようにその大小も間隙比に対応したものになっている。図-3より、密詰め供試体に比べ緩詰め供試体の方が、変相点が明確に出ていることが確認できる。最大せ

断応力比から算定した内部摩擦角 ϕ' は、密詰め供試体で $\phi' = 35.2^\circ$ 、緩詰め供試体で $\phi' = 33.4^\circ$ となった。

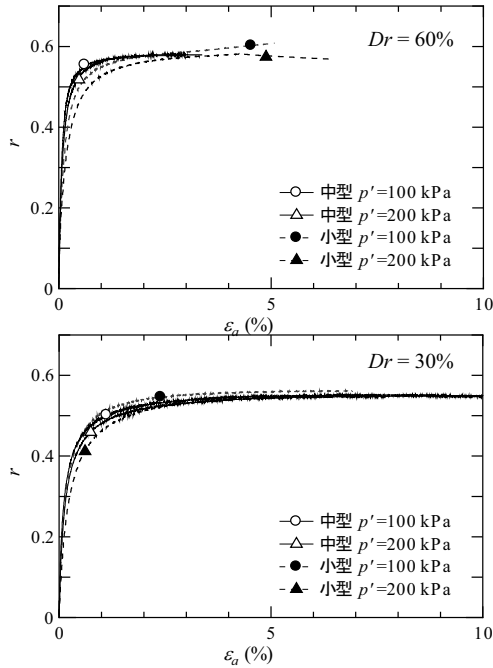


図-2 軸ひずみ-せん断応力関係

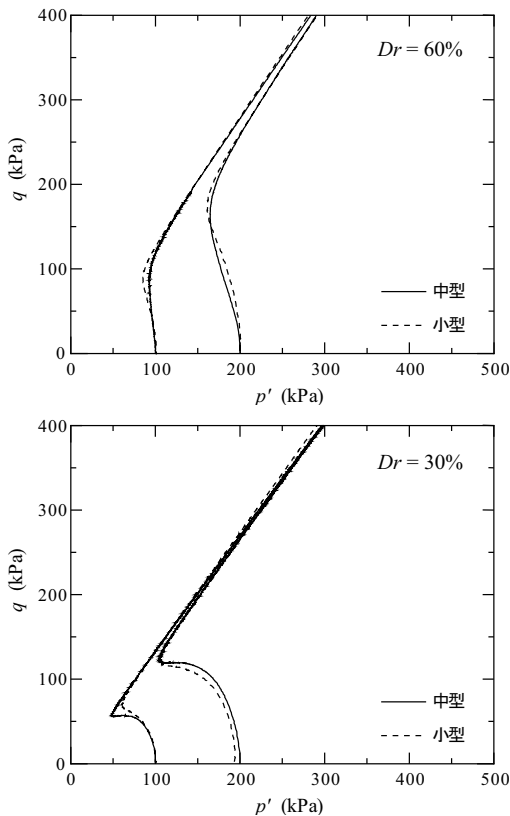


図-3 有効応力経路

4. 非排水繰返し三軸試験

本研究での検討項目を述べる。検討項目は大別すると3

項目である。1つ目は、変位制御繰返し载荷において周波数が一定となるように、ステージごとにひずみ速度を変化させたことによる変形特性への影響である。2つ目は、繰返し振幅条件の違いが変形特性に与える影響である。3つ目は、繰返し载荷と単調载荷試験結果を比較する。以上のことを考慮し、表-3 に示す試験条件とした。ここで、サイクルとステージについて説明する。JGS 0542-2009 では、繰返し载荷回数とステージ载荷を以下のように規定している。繰返し载荷回数は、同一の繰返し応力(あるいはひずみ)振幅のもとで11波载荷することとしており、本論文ではこの1波を1サイクルとしている。ステージ载荷は、一つの供試体を用いて繰返し応力(あるいはひずみ)振幅を段階的に増加させることにより所定のひずみ範囲での E_{eq} , $h-(\varepsilon_a)_{SA}$ 関係を求める方法を規定しており、本論文でも同様とした。また、ステージ载荷であるため繰返し载荷は非排水条件で行い、ステージ終了後に等方応力状態とするため排水させている。表-3 には振幅値と軸ひずみ速度ともに、左から順に各ステージにおいて設定する値を記載した。繰返し载荷を軸ひずみ振幅一定としたときは、局所変位計の値を用いて求めた局所軸ひずみ ($(\varepsilon_a)_{local}$) により制御を行った。また、全ての試験において $p' = 100$ kPa、背圧 200 kPa とした。载荷波形は油圧による応力制御型試験装置を使用した case8 のみ正弦波 0.1 Hz であり、その他の case では三角波である。試験方法は地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し試験三軸試験方法」(JGS0542)に従った。結果の整理では、各ステージ繰返し载荷5回目の結果を用いて等価ヤング率、履歴減衰率を求めた。図-4 には各ステージ载荷開始時における間隙比を示した

4.1 軸ひずみ速度が変形特性に与える影響

図-5 に密詰め供試体に対して、変位制御方式による繰返し载荷振幅を軸ひずみ一定としたときの等価ヤング率-片振幅軸ひずみ-履歴減衰率の関係を示す。表-3 に示すように、case5 はすべてのステージにおいて軸ひずみ速度一定、case2, 3, 4 はステージごとにひずみ速度が異なっている。case2, 3, 4 の第1ステージの軸ひずみ速度はcase5 に対しそれぞれ、同じ速度、1/10, 1/5 としている。なお、case2, 3, 4 の第2ステージ以降の軸ひずみ速度は、第1ステージの周波数と等しくなるように、各ステージの軸ひずみ速度を設定している。これは、通常の油圧による応力制御繰返し载荷条件(case8)と比較すると、繰返し载荷波形が正弦波ではなく三角波であることと、応力制御のように1サイクル内で軸ひずみ速度が変化しない点が異なる。ここで軸ひずみ速度については、载荷装置にパルスモータを

表-3 繰返し試験条件

試験装置	設定する振幅	e_0	各ステージにおいて設定する振幅値 ($(\epsilon_a)_{local}$ または q) と軸ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_a$ %/min)
case1	変位制御型 三軸試験装置	0.876	$(\epsilon_a)_{local} = 0.001, 0.002, 0.004, 0.008, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08$ $\dot{\epsilon}_a = 1.76, 3.52, 7.04, 14.2, 17.6, 35.2, 70.4, 142 (\times 10^{-3})$
case2		0.753	
case3		0.754	
case4		0.751	
case5		0.756	
case6	応力 振幅一定	0.892	$q = 2, 4, 8, 12, 16, 22, 28$ (kPa) $\dot{\epsilon}_a = 2.20, 4.40, 8.80, 13.3, 17.8, 24.4, 31.1 (\times 10^{-3})$
case7		0.744	$q = 2, 4, 6, 10, 18, 26, 40$ (kPa) $\dot{\epsilon}_a = 2.20, 4.40, 6.60, 11.1, 20.0, 28.9, 44.4 (\times 10^{-3})$
case8	応力制御型 三軸試験装置	0.760	$q = 2, 4, 8, 12, 16, 22, 28$ (kPa) 0.1Hz (正弦波)

用いていることにより、広い範囲の载荷速度を設定可能であるが、測定装置の制約により遅い測定周波数とせざるを得ないため、表-3 に示す軸ひずみ速度とした。試験に影響を及ぼす要因としては、繰返し载荷時の間隙比が考えられる。表-3 に示すように case2, 3, 4, 5 の圧密終了後(第1ステージ载荷開始時)の間隙比の差は、0.005 以内であることと、図-4 に示すように各ステージ終了後に排水条件としているが第6ステージまで間隙比はほとんど変化していない。したがって、図-5 に示す試験結果に間隙比の差異が及ぼす影響は少ないと考えられる。図-5 より、 $(\epsilon_a)_{SA} = 1 \times 10^{-3} \%$ (第1ステージ) では case2 のみ他の case と比較して、等価ヤング率が 20 MN/m^2 程度小さい値となっている。 $(\epsilon_a)_{SA} = 2 \times 10^{-3} \% \sim (\epsilon_a)_{SA} = 8 \times 10^{-2} \%$ (第2~8ステージ) では case2 と case3, case4 と case5 がそれぞれほぼ等しい等価ヤング率を示し、その差は、 $(\epsilon_a)_{SA} = 8 \times 10^{-2} \%$ まで 10 MN/m^2 以内となっている。履歴減衰率は、全てのステージにおいてほぼ同じ値を示した。以上より、ステージ毎にひずみ速度が変化しても、求められる等価ヤング率に与える影響は少ないことがわかる。

4.2 繰返し载荷振幅の違いの影響

繰返し载荷振幅を軸ひずみ一定としたものと、応力振幅一定としたものを比較する。なお、密詰め、緩詰め供試体それぞれで比較を行った。ここで表-3 に示す case8 は、応力制御繰返し载荷装置を用いており、小型供試体、载荷波形は正弦波となり他の case と異なっている。

図-6 に密詰め供試体、図-7 に緩詰め供試体の等価ヤング率-片振幅軸ひずみ-履歴減衰率関係を示す。図-6、図-7 より、変位制御载荷装置における繰返し振幅設定の違いは、等価ヤング率、減衰率ともに各ひずみレベルにおいて各 case の差は2%以内であり、その差は小さいことがわかる。

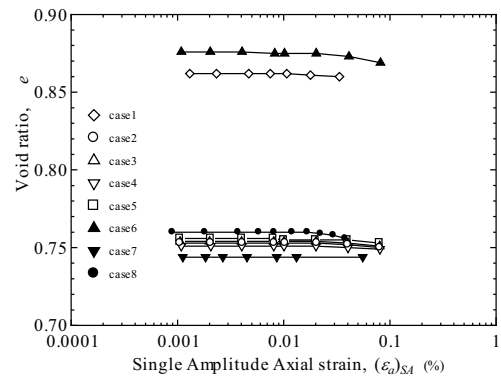


図-4 繰返し载荷時の間隙比変化

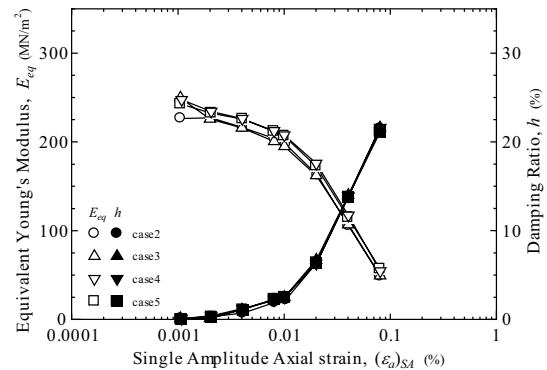


図-5 軸ひずみ速度の影響 (密詰め)

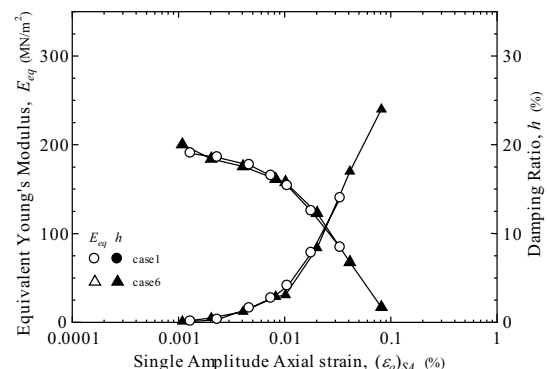


図-6 繰返し载荷振幅の違いの影響 (密詰め)

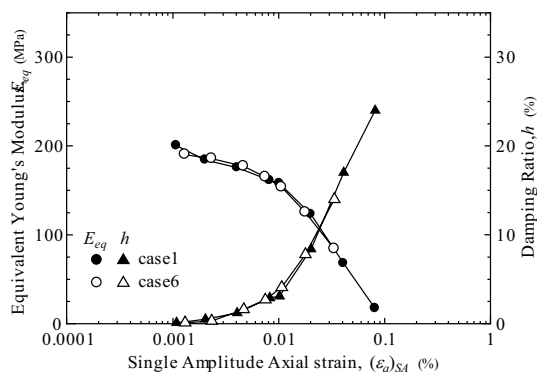


図-7 繰返し载荷振幅の違いの影響 (緩詰め)

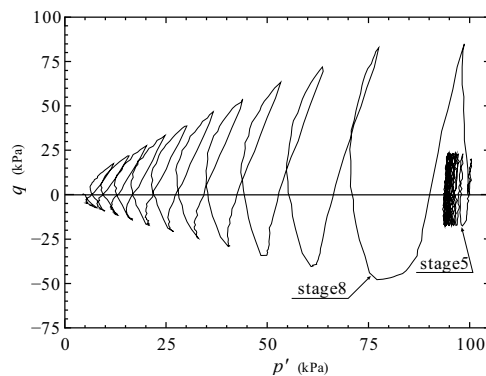


図-8 p'-q 関係 (case3)

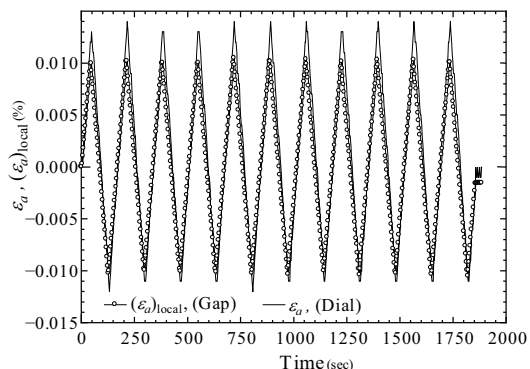


図-9 軸ひずみ - 時間関係 (case3, stage5)

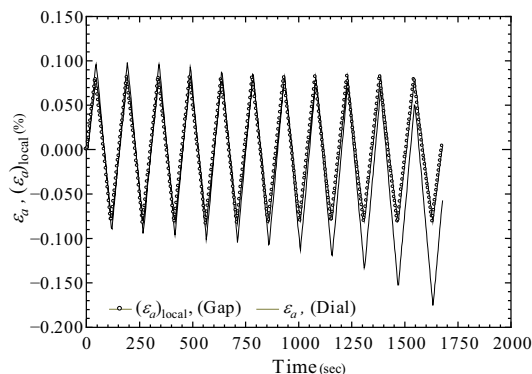


図-10 軸ひずみ - 時間関係 (case3, stage8)

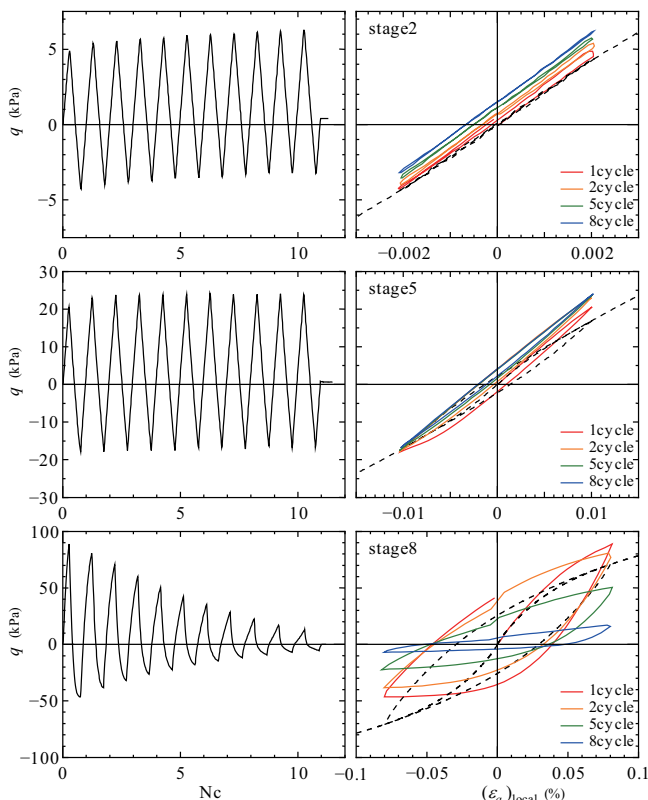


図-11 繰返し载荷振幅の違いの影響(密詰め, case2)

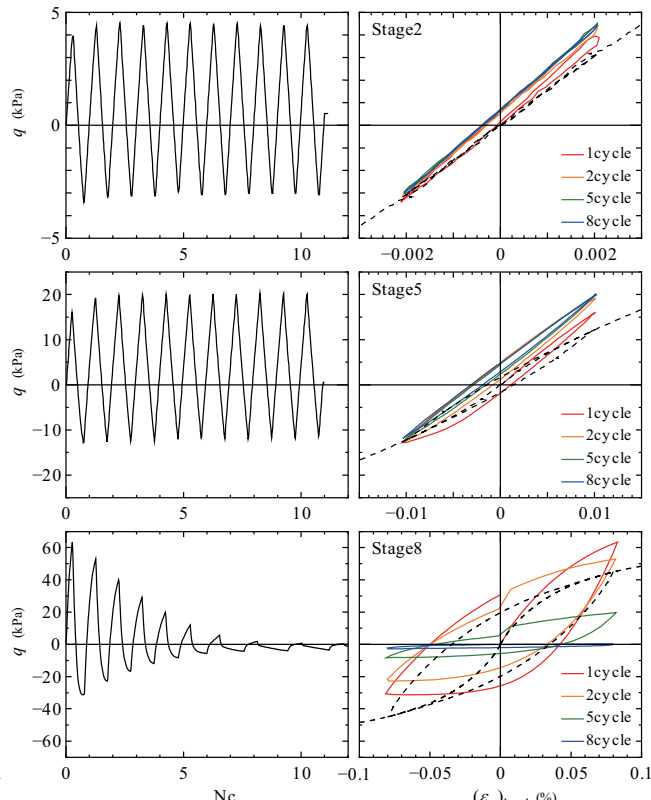


図-12 繰返し载荷振幅の違いの影響(緩詰め, case1)

ただし、応力振幅一定とした場合は伸長側で先に破壊してしまうため、軸ひずみ一定とした試験よりもステージ回数が少なくなっている。

図-6 には、case8 の油圧による応力制御試験結果を示している。 $(\epsilon_a)_{SA}=2 \times 10^{-3}\% \sim (\epsilon_a)_{SA}=8 \times 10^{-2}\%$ では他の case と比較し大きい等価ヤング率となり、それ以降は他の case

とほぼ同じ等価ヤング率となった。図-4 に示す間隙比変化より、case8 は他の試験結果に比べ緩い間隙比である。

したがって、間隙比に差異がない場合、現在より大きい等価ヤング率となることが考えられる。ただし、前述のように応力制御装置は液状化強度測定用のものを用いているため、荷重計が低容量のものではない。したがって、

微小ひずみ領域の荷重を精度よく測定できていないことが考えられ、この点については再度検討したい。

4.3 繰返し载荷回数と軸差応力、軸ひずみの関係

図-8, 図-9, 図-10 は、すべて case3 の試験結果である。ここで、異なる stage を比較検討するため、stage5 と stage8 の結果を用いて図を描いた。図-8 には軸差応力-平均有効主応力関係を示す。図-9, 図-10 は、外部変位計(Dial)と局所変位計(Gap)の測定結果より求めた軸ひずみ-時間関係を示し、外部変位計により求めた軸ひずみを ϵ_a 、局所変位計より求めた軸ひずみを $(\epsilon_a)_{local}$ とした。また、図-9 は stage5, 図-10 は stage8 の結果である。図より、繰返し载荷終了時の p' は、stage5 では 93kPa, stage8 では 5kPa となった。また、圧縮側と伸張側で軸差応力が大きく異なる。これは供試体作成方法が空中落下法であるため、構造異方性を有しているためと考えられる。

図-9 と図-10 より、 ϵ_a と $(\epsilon_a)_{local}$ は一致しないことがわかる。軸ひずみ振幅一定条件の試験 case は、 $(\epsilon_a)_{local}$ により反転を制御している。stage5 では、図-9 より圧縮側で 0.003% ほど ϵ_a は $(\epsilon_a)_{local}$ より大きく、伸張側ではほぼ一致した。これに対し stage8 では、図-8 と図-10 より ϵ_a の伸張側への増加が顕著になるのは平均有効主応力が 30kPa 以下であることがわかる。繰返し载荷 11 サイクル終了時の両振幅軸ひずみで比較すると、 ϵ_a は $(\epsilon_a)_{local}$ に比べほぼ 2 倍となった。このように ϵ_a と $(\epsilon_a)_{local}$ の関係は、ひずみレベルによって変化することがわかる。ここで、各ステージで設定する軸ひずみ速度は、設定する軸ひずみ振幅と各試験 case の第 1 ステージにて設定した周波数となるように計算して設定している。しかし ϵ_a と $(\epsilon_a)_{local}$ は、ステージの進行とともに設定するひずみ振幅、または応力振幅が増加させることに伴い、その差が増加していく。その結果、1 ステージの繰返し载荷に要する時間はステージごとに異なることになり、それは図-9 と図-10 の比較からもわかる。このように軸ひずみ速度を設定し繰返し载荷を行っているが、実際は設定した軸ひずみ速度で試験を実施できていないことがわかる。

図-11 に case2(密詰め)、図-12 に case1(緩詰め)に対し、変位制御方式によるひずみ振幅一定繰返し载荷としたときの繰返し载荷回数-軸差応力関係と、軸ひずみ-軸差応力関係を示す。ここで各図の繰返し载荷回数-軸差応力関係は、第 2 ステージ、第 5 ステージ、第 8 ステージである。また、軸ひずみ-軸差応力関係は各ステージの 1, 2, 5, 10 サイクルを示した。図-11, 図-12 の繰返し载荷回数-軸差応力関係の第 2 ステージ、第 5 ステージの結果より、密詰め、緩詰めともに繰返し载荷の進行とともに圧縮側の

強度が増加しており、特に第 1 サイクルの軸差応力が以降のサイクルと比較して小さいことがわかる。また、密詰めの第 2 ステージのみ、平均軸差応力が圧縮側へ増加している点が他と比較し顕著である。図-11, 図-12 の軸ひずみ-軸差応力関係には、非排水三軸圧縮試験の結果と Masing 則を用いて、骨格曲線と履歴曲線を描いている。Masing 則は骨格曲線を相似的に大きくすることで履歴曲線を描くものであるが、図には相似比を 2 として描いた。図-11, 図-12 の第 2 ステージ、第 5 ステージの結果より反転する軸差応力に着目する。軸ひずみ振幅一定であるため、反転する軸ひずみは一定となる。骨格曲線との関係は密詰め緩詰めともに、伸長側では第 10 サイクルまで履歴曲線とほぼ一致している。それに対し圧縮側では、第 1 サイクルから履歴曲線より大きくなり、第 2 サイクル以降は第 10 サイクルまでせん断挙動はほとんど変化しない。第 8 ステージでは、繰返し载荷とともに軸差応力が大きく減少していくが、軸ひずみ振幅一定による繰返し载荷であるため、第 10 サイクルまで問題なく試験を行えていることがわかる。

5. 結論

本研究では、変位制御载荷装置を用いて繰返し変形特性を求めめるための繰返し三軸試験を実施し、主に振幅条件が変形特性に与える影響について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 周波数がほぼ一定となるようにステージ間でひずみ速度を変化させたことによる、変形特性への影響は小さい。
- (2) 今回行ったひずみレベルの範囲内では、制御方式が異なることによる変形特性への影響は小さい。
- (3) 変位制御方式による軸ひずみ振幅一定試験であっても、与える軸ひずみが増加するにつれて ϵ_a と $(\epsilon_a)_{local}$ の差が増加する。したがって、ひずみ速度に着目した試験を行なう場合には注意する必要がある。

参考文献

- 1) 吉田望, 三上武子: 時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を, 地盤工学会誌, vol158, No2, pp. 1-5, 2010.
- 2) 副田悦生, 玉井秀喜, 田中昌廣, 竹澤請一郎, 前川太: 等価線形解析パラメータに及ぼす地震動のひずみレベルと繰返し回数の影響, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 197-209, 2002.
- 3) JGS 0542-2009: 「地盤材料の変形特性を求めめるための繰返し三軸試験方法」, 地盤材料試験の方法と解説,

地盤工学会, pp. 750-783, 2009.

- 4) 規矩大義, 吉田望: 大ひずみ領域まで考慮した豊浦砂の動的変形特性試験, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp869-870, 1998.
- 5) 西川昌芳, 早野公敏, 古関潤一: 繰返し三軸試験における異なる載荷方法が密な砂質土の変形特性に及ぼす影響, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp819-820, 2000.
- 6) 吉田望, 三上武子, 澤田純男, 規矩大義: 地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案(その2), 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp. 417-418, 2006.

(2012年6月25日 受付)

