

砂の繰返し載荷特性における応力比・密度・主応力方向の影響

(The influence of the applied stress ratio, density and the direction of principal stress
on the deformation characteristics of sand during cyclic loading)

山崎光¹, 伴旭将², 京川裕之³, 菊本統⁴, 中井照夫⁵, 石原隆寛⁶

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・博士前期課程1年

2 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・博士前期課程2年

3 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・博士後期課程3年

4 名古屋工業大学・都市社会工学科・助教 (kikumoto@nitech.ac.jp)

5 名古屋工業大学・都市社会工学科・教授

6 名古屋市役所 (元名古屋工業大学大学院・社会工学専攻)

概 要

ダイレイタンシー特性は、せん断応力載荷時の土の変形特性を説明する上で、もっとも特徴的な現象である。同特性に関しては、多くの検討および説明がなされているが、繰返し載荷時の土の変形特性は未だ不明瞭な部分が多く、特に排水時繰返し載荷による変形（体積圧縮）の収束に関しては適切な説明がなされていない。しかしながら、繰返し載荷時の力学特性は、排水時には地盤の締固め、非排水時には液状化現象などの地盤工学が対象とする多くの諸問題と密接に関係するため、そのメカニズムの解明が望まれる。本稿では三軸試験および三主応力制御試験機を用いて密度および繰返し応力比の異なる繰返しせん断試験を行い、砂の繰返し載荷特性における応力比・密度・主応力方向の影響について検討した。その結果、土は繰返し載荷に伴ってダイレイタンシー特性を変化させながら、ある間隙比においてせん断および体積変化とともに収束する。さらに、その間隙比は、応力比・密度・主応力方向の影響を受けることが示された。

キーワード：繰返しせん断，砂，誘導異方性，ダイレイタンシー

1. はじめに

地盤材料は鉄やガラスといった連続体とは異なり、せん断応力変化に伴う体積変化、いわゆるダイレイタンシー特性を示す。このダイレイタンシー特性は、コンクリートなど他の材料にも見られるが、土のような粒状体の集合体においてその影響は顕著である。そのため古くから研究が盛んに行われており、ダイレイタンシーは同じ土であっても、土の密度や応力レベルおよび応力比によってその振る舞いが大きく異なり、間隙比が小さい（密度が大きい）とせん断時に体積膨張を示し、一方、間隙比が大きい（密度が小さい）と体積圧縮（負のダイレイタンシー）を示すことが広く知られている。

たとえ密に詰めた土も圧縮および伸張状態などの繰返しせん断応力を作用させると、少なからず体積圧縮を示し、ある密度に収束することが示されている¹⁾。これは、静的な荷重増加に対しては、大きな上載圧をかけるよりも、様々な方向から繰返しせん断させる方が容易に圧縮することからも分かる。また地震動のように、間隙水の排出が間に合わない短時間の不規則な繰返し載荷では、繰返し時

に圧縮傾向を示すダイレイタンシー特性が原因で、正の過剰間隙水圧が発生するため、有効拘束圧が減少して、ついには液状化現象に至る。

以上に示すような排水および非排水繰返しせん断時における土のダイレイタンシー特性に関してこれまでに多くの研究成果が挙げられているが、定性的かつ定量的に繰返し時のダイレイタンシー特性を適切に評価する予測手法は未だ開発されておらず、近年では地盤の液状化現象に着目して、非排水条件での繰返し（三軸およびねじり）せん断試験が多く行われている。しかしながら、先に示すような排水条件下での繰返しせん断時の体積変化の収束などに関しては、適切な説明がなされないままである。また、排水・非排水条件の違いは、体積変化を許さないように束縛力として発生する過剰間隙水圧による有効応力経路の違いであると考えられるため、土のダイレイタンシー特性を精緻に考察するためには、排水試験による検討が本質的であると考えられる。

したがって、本研究では、三軸試験機および三主応力制御試験機を用いて、密度・繰返し応力比および主応力方向を変えた排水条繰返しせん断試験を行い、土の繰返し変形

特性,特にダイレイタンス特性の変化および変形の定常化に関して詳細な説明を加える。

2. 試験概要

ここでは、本試験で用いる試料および供試体の作成方法、供試体の初期状態の説明および試験機(三軸試験および三主応力制御試験)の概要を示す。

2.1 実験に用いた試料と供試体

実験には豊浦標準砂(土粒子比重: $G_s = 2.65$)を用いた。供試体は水中落下法により作成し、目標の間隙比(緩詰め: $e_0 = 0.85$, 密詰め: $e_0 = 0.68$)になるように、突き固め回数を調整して作成した。供試体は、三軸試験では高さ 12.15cm, 直径 5cm の円柱形, 三主応力制御試験では高さ 10cm, 幅 10cm, 奥行き 7cm の直方体である。

また、試験では繰返し載荷時の変形が収束した状態における微小な変形まで計測するため、供試体周囲のメンブレンが粒子間に貫入する分の体積変化を補正することで、正確な体積変化量を計測する。

2.2 供試体の初期異方性

上記の手順で作成された緩詰めおよび密詰め供試体について、等方圧密試験を行い、供試体作成時に形成される初期異方性の検証を行った。この結果、密詰め供試体は軸差ひずみ ($\varepsilon_d = 2/3 * (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$) が発生しない理想的な等方圧密挙動を示し、初期異方性の影響は確認されなかった。一方で、緩詰め供試体は、軸差ひずみが負の方向に発生したため、側方ひずみに対して軸ひずみが発生しにくいような堆積過程における典型的な初期異方性の発生が確認された。本稿で示す繰返しせん断試験では、応力載荷に伴って、様々な方向に初期異方性を打ち消す誘導異方性が発達すると考えられるため、供試体の初期異方性の影響を無視して実験および検討を行う。

2.3 実験ケース

以下に本研究で行った繰返し三軸試験および三主応力制御試験の実験ケースをまとめる。

(1) 繰返し応力比振幅一定の両振り(圧縮・伸張)繰返し三軸試験

表 - 1 に、繰返しせん断試験の応力経路ならびに試験種別をまとめる。試験の応力経路は、 $p = 196\text{kPa}$ の等方応力状態から平均主応力一定のまま応力比振幅を $q/p = 1.37 \Leftrightarrow -0.94$ ($R = \pm 3.5$), $q/p = 1.2 \Leftrightarrow -0.86$ ($R = \pm 3.0$), $q/p = 0.75 \Leftrightarrow -0.6$ ($R = \pm 2.0$) の 3 パターンとして、せん断変形・体積変化とともに収束する(定常状態)に至るまで繰返し載荷を与えた。ここに、 R は主応力比($R = \sigma_1/\sigma_3$)であり、応力比振幅 q/p および R は、圧縮側と伸張側を区別するために伸張側を負としている。また、各応力経路で密詰めと緩詰め供試体を用いて実施し、繰返し載荷特性に及ぼす密度の影響を検討する。

試験種別は、たとえば“D3.5-CE”のように表される。はじめの“D”は初期密度を表し、D (Dense) もしくは L (Loose) となり、“3.5”は繰返し応力比振幅を表すため($R = 3.5, 3.0, 2.0$ となる)。最後の“CE”は、繰返しせん断時の応力状態を表し、“CE”ならば圧縮・伸張側に繰返しせん断、“C”なら圧縮側のみ、“TC”は各三主応力を最大主応力とする圧縮せん断を表すこととなる。

(2) 応力比振幅を増加させた両振り(圧縮・伸張)繰返しせん断試験

ある応力比振幅で繰返しせん断を与え、定常状態に至った土にさらに大きな応力比振幅を与えた際の変形特性について検討する。応力経路を図-1 示す。応力経路は、(1)と同様に $p = 196\text{kPa}$ の等方状態を初期状態として、平均主応力一定下で応力比振幅 $q/p = 0.75 \Leftrightarrow -0.6$ ($R = \pm 2.0$) の繰返し載荷を行い定常状態に至った後、応力比振幅 $q/p = 1.2 \Leftrightarrow -0.86$ ($R = \pm 3.0$), $q/p = 1.5 \Leftrightarrow -1.0$ ($R = \pm 4.0$) と同様に定常化確認後に繰返し応力比振幅を増加させていく。用いた試料は、中密試料 ($e_0 = 0.77$) の一種類のみの結果を示す。

(3) 主応力方向の異なる応力比振幅一定繰返しせん断試験 - 両振り(圧縮・伸張)、片振り(圧縮)、三主応力(圧縮)

続いて、繰返し載荷時の力学特性に及ぼす主応力方向の影響に関して検討を行うため、三主応力制御試験機を用いた繰返し載荷試験を行った。基本的にはこれまでに示した(1),(2)の実験と同様に、平均主応力 $p = 196\text{kPa}$ 一定下で、繰返しせん断試験を行う。応力経路は、図-2 に示すように、 a 方向に $q/p = 1.2 \Leftrightarrow 0$ ($R = 3$) の圧縮側のみの片振りせん断を行い、続いて l 方向、 r 方向の順に同様の片振りせん断を変形が収束するまで行う(D-3.0TC)。表に示す θ は、 π 面上における載荷方向を表す Lode 角: θ を表す。

また、比較のために、三軸試験機を用いた同様の片振り繰返しせん断試験も行う(D-3.0C, D-3.0CE)。

なお、全ての試験は排水条件で、三軸試験は軸ひずみ制御(軸ひずみ速度: $0.03(\%/h)$)、三主応力制御試験は全主応力共に応力制御にて行った。また、全ての試験は 98kPa のバックプレッシャーを一定で与えている。なお、本文で示す応力はすべて有効応力である。

3. 実験結果と考察

3.1 繰返し応力比振幅一定の両振り(圧縮・伸張)繰返し三軸試験

図 - 3 に、密詰め供試体の主応力比 $R = 3.5$ の繰返しせん断試験 (D3.5-CE) の軸差ひずみ ε_d - 応力比 q/p 関係を示す。土は繰返し回数の増加に伴い徐々にせん断剛性が大きくなり、やがて変形が収束し、ループを描くような挙動が確認できる。密度や繰返し応力比振幅に依らず、このような繰返し載荷時のせん断変形の収束が確認できた。

以後、本論文では繰返し載荷時のダイレイタンス挙動

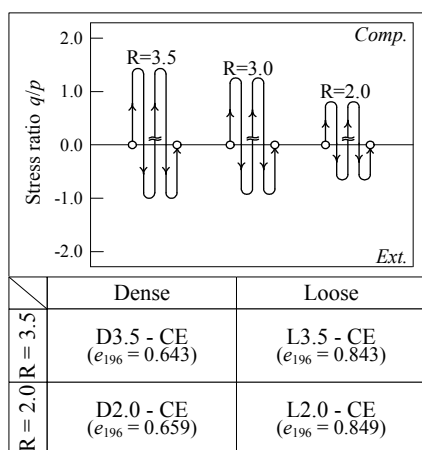


表 - 1 繰返し応力比振幅一定の両振り繰返しせん断試験の応力経路ならびに試験種別

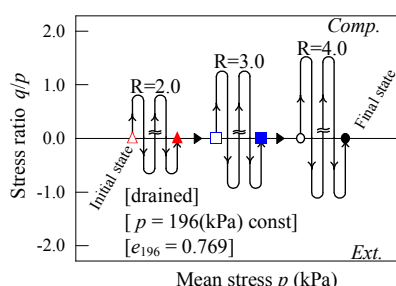


図 - 1 応力比振幅を増加させた両振り繰返しせん断試験の応力経路

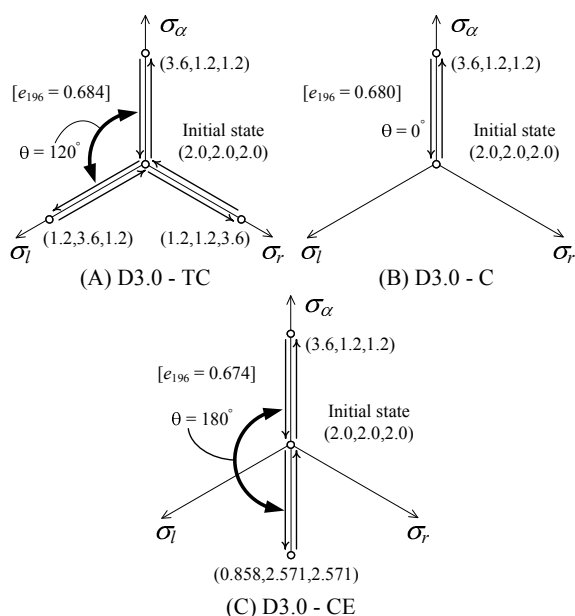


図 - 2 主応力方向の異なる応力比振幅一定繰返しせん断試験の応力経路

および変形定常状態に着目して検討を行っていく。

(a) 応力比 q/p - 間隙比 e 関係

図 - 4 に繰返し応力比振幅 $R = 2.0$ および 3.5 の密・緩詰め供試体の試験結果の応力比 q/p - 間隙比 e 関係をまとめ

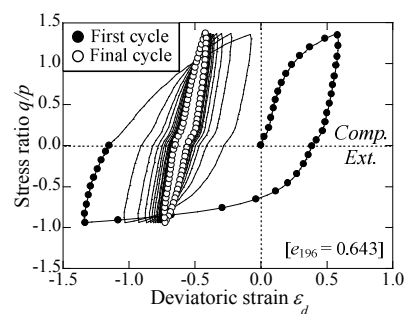


図 - 3 主応力比 $R = 3.5$ の繰返しせん断試験(密詰め)における軸差ひずみ ϵ_d - 応力比 q/p 関係

る。図-4 から、繰返し以前の単調荷重時には、応力比振幅 $R = 2$ では初期密度によらず終始圧縮挙動を示し (L2.0-CE, D2.0-CE), $R=3.5$ の緩詰め供試体 (L3.5-CE) でも同様に体積圧縮している。一方で、応力比振幅が $R = 3.5$ の密詰め供試体 (D3.5-CE) だけは、応力比 $q/p=1.0$ 付近を境に膨張挙動を示す。土の体積変化挙動 (圧縮もしくは膨張) は、ストレスダイレイタンスー関係から応力比によって一意に決定されることが多いが、本試験結果のように密度の影響を受けることも過去の研究¹⁾で指摘されている。

単調荷重後、荷重方向が逆転すると全てのケースで大きな体積圧縮挙動が見られる。D3.5-CE では、初期荷重経路において膨張挙動を示すに関わらず、大きく体積圧縮する。また、これら全ての体積圧縮挙動は、荷重経路が反転した直後の除荷過程においてその発生が確認でき、伸張側での応力比の増大とともに、大きく体積圧縮する。ただし、D3.5-CE および L3.5-CE では、伸張側の応力比増加とともに、最終的には膨張挙動を示す。一般的に土は、荷重方向と同一方向にコラムを形成するように土粒子配列が変化し、その影響を受けて土の剛性が異方的に変化する (元々の荷重方向に強い構造を示す)、いわゆる誘導異方性が知られている。この誘導異方性を受けて一度発達した粒子配列が、荷重方向の変化とともに消散し、その際に大きな体積圧縮挙動が生じると考えられる。

その後の繰返し荷重経路においても、同様に体積圧縮挙動は見られるものの、繰返し回数の増加とともに圧縮量は減少し、最終的にはある間隙比において、図 - 3 に示したせん断変形と同様に体積変化が収束する定常状態に至る。図 - 5(a), (b) はそれぞれの試験での定常状態 (試験終了前の最終サイクル) における応力比 q/p - 間隙比 e 関係の拡大図をそれぞれ表している (サイクル初期の等方応力状態を始点として、間隙比軸のプロットを重ねて示している)。図 - 5 から、定常状態での体積変化挙動は、繰返し応力比振幅および初期間隙比によらず “8 の字” を描くようなループ挙動を示す。また、多少の差異はあるものの、繰返し応力比振幅が大きいほど、ループは大きくなっている。このようなループ挙動から、変形定常状態では弾性特性によって変形が収束しているわけではなく、弾塑性的な変形による圧縮量と膨張量がバランスしている。つまり、初期の

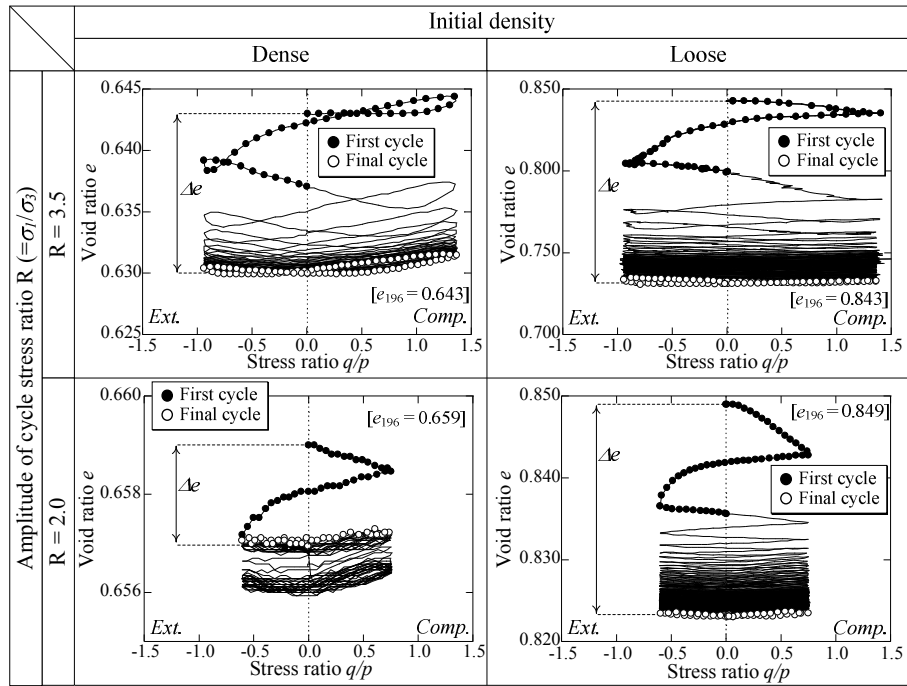
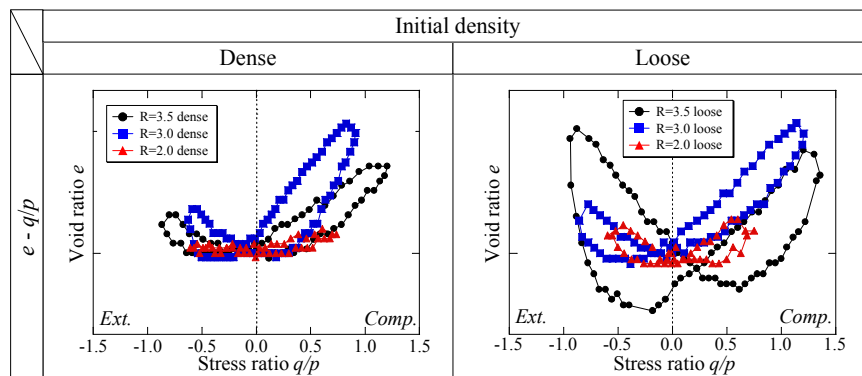


図 - 4 主応力比 $R = 2.0$ および 3.5 の繰返しせん断試験
(密詰め・緩詰め)における応力比 q/p –間隙比 e 関係



(a) 密詰め (b) 緩詰め

図 - 5 最終サイクルにおける応力比 q/p –間隙比 e 関係の比較図

単調荷重において体積圧縮挙動を示していた L2.0-CE, D2.0-CE および L3.5-CE は、繰返しせん断を与えることにより、同一の繰返し応力比において膨張挙動を示すように変化したことになる。次節では、これらダイレイタンス特性の変化を検討する。

(b) 応力比 - ひずみ増分比 (ストレスダイレイタンス) 関係

図 - 4 に対応した試験結果における応力比 t_S/t_N –ひずみ増分比 $-d\epsilon_N^*/d\epsilon_S^*$ (ストレスダイレイタンス) 関係を図 - 6 にまとめる。図 - 6 は、中井らが提案する修正応力 t_{ij} の概念²⁾におけるひずみ増分パラメータ ($d\epsilon_N^*$, $d\epsilon_S^*$) および応力パラメータ (t_N , t_S) を用いて整理しており、そのため、中間主応力の程度によらずストレスダイレイタンス関係を一意的に記述する³⁾ことができる。なお各図中の破

線は、体積ひずみ増分の圧縮と膨張の境界 “ $d\epsilon_v = 0$ ”, ●プロットは 1cycle 目, ○プロットは試験最終サイクルでの値をそれぞれ表す。また、弾塑性論を適用する際には、ストレスダイレイタンス関係は塑性ひずみ増分を用いて表されるが、実測値において弾性ひずみ増分が微小であると考えて、本試験では全ひずみ増分を用いて実測値を整理している。

図 - 6 より、First cycle (●プロット) は D3.5-CE を除いた 3 つのケースでは、常に “ $d\epsilon_v = 0$ ” のラインを越えておらず、前節 (a) で示した単調荷重時のストレスダイレイタンス関係の違いが表現されている。また、圧縮側から伸張側へと荷重方向が転じた後に、早々と体積圧縮が発生していることも同図から確認できる。

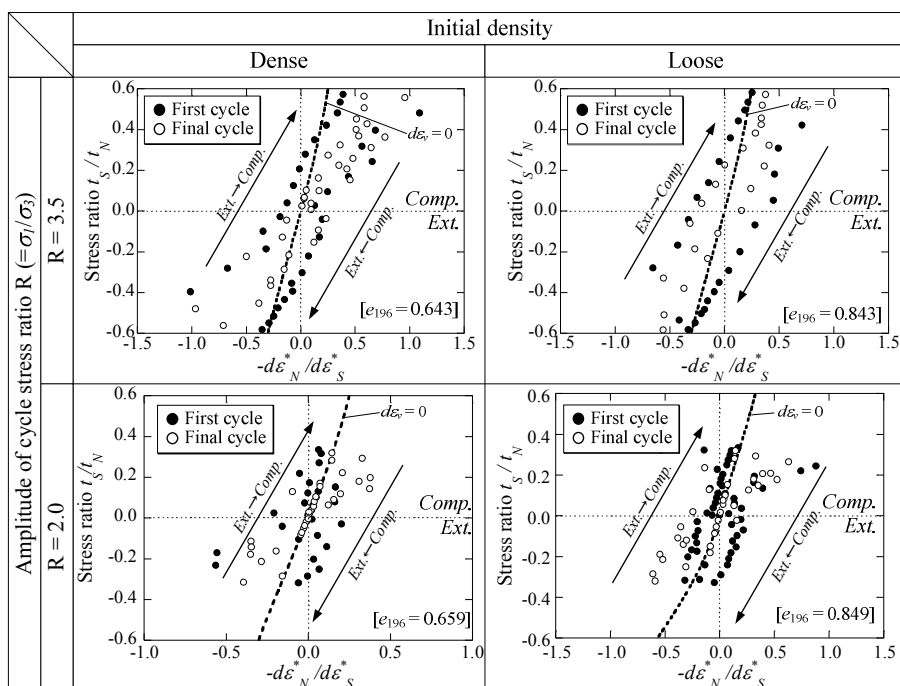


図 - 6 主応力比 $R = 2.0$ および 3.5 の繰返しせん断試験(密詰め・緩詰め)における応力比 t/t_N - ひずみ増分比 $-d\epsilon_N^*/d\epsilon_S^*$ 関係

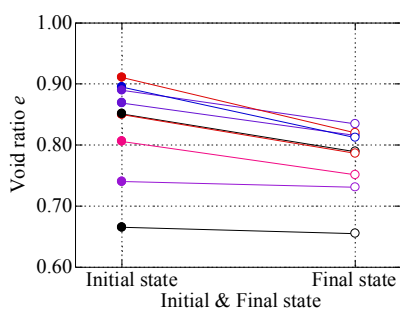


図 - 7 主応力比 $R=3.0$ における定常状態に至るまでの間隙比変化の初期密度による影響

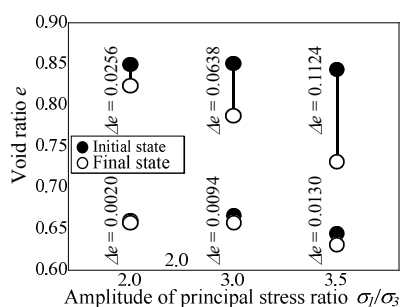


図 - 8 定常状態に至るまでの間隙比変化の初期密度・主応力比の影響

次に、繰返し载荷後、変形が収束した際のストレスダイレイタンスー関係—Final cycle (○プロット)を見ると、全てのケースにおいて First cycle (●プロット) よりも内側に値が寄っており、より低い応力比で膨張挙動を示すようにストレスダイレイタンスー関係が移動していることとなる。特に初期に体積圧縮挙動のみを示していた3ケース (D3.5-CE 以外) では、同一応力比振幅において “ $d\epsilon_v = 0$ ” のラインを横切るように圧縮から膨張挙動へと変化している。

以上のことから、土は同一経路を辿る繰返しせん断を受けると、せん断および体積剛性が増加しながら徐々に変形が減少すると同時に、ストレスダイレイタンスー関係は中心に寄り、土は膨張傾向を示すように変化する。最終的には、弾塑性的な体積圧縮と膨張がバランスするループ挙動を示す定常状態へと至る。

(c) 繰返し応力比振幅および初期密度の影響

図 - 7 は、初期密度の異なる供試体を用いた繰返し応力比振幅 $R = 3.0$ 一定せん断試験における定常状態に至るまでの間隙比変化をまとめた。図から、多少の誤差はあるものの初期密度に応じて、それぞれ異なる密度で定常状態に至っていることが分かる。

図 - 8 に、繰返し応力比振幅一定せん断試験全6ケースにおける定常状態に至るまでの体積変化量 (Δe) をまとめる。図中の○プロットが試験開始時の間隙比、●プロットが繰返し定常状態に至った試験終了時の間隙比を表している。図から、初期間隙比が大きいほど、繰返し応力比振幅が大きいほど、载荷時に生じる体積圧縮量は大きくなることが分かる。

3.2 応力比振幅を増加させた両振り（圧縮・伸張）繰返しせん断試験

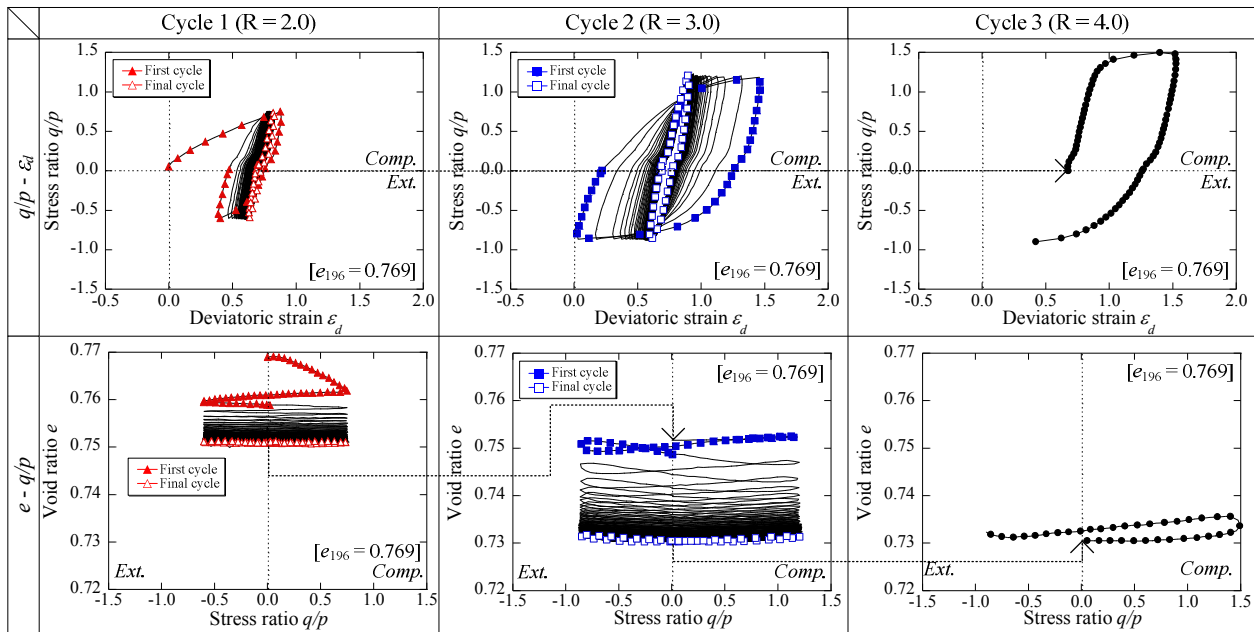
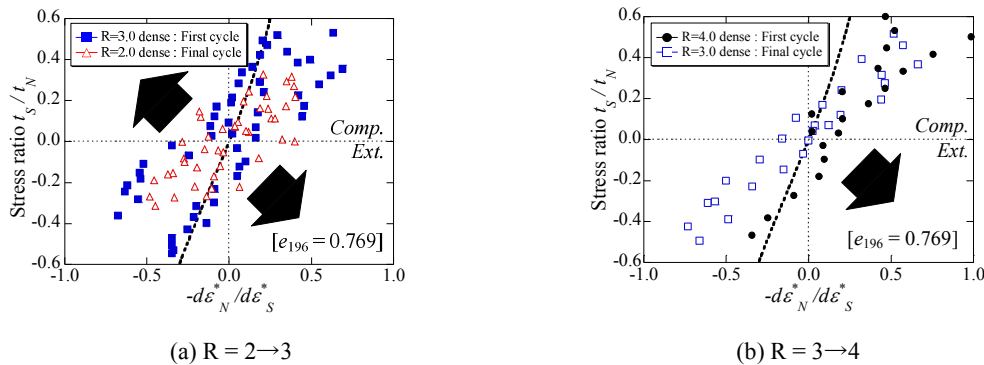


図 - 9 各繰返し応力比振幅での軸差ひずみ ε_d –応力比 q/p 関係および応力比 q/p –間隙比 e 関係



(a) R = 2→3

(b) R = 3→4

図 - 10 応力比増加時におけるダイレイタンシー特性の変化

(a) 応力–ひずみ関係

図 - 9 に、各繰返し応力比振幅での軸差ひずみ ε_d –応力比 q/p 関係および応力比 q/p –間隙比 e 関係をまとめる。図上段の軸差ひずみ ε_d –応力比 q/p 関係から、 $q/p = 0.75 \Leftrightarrow -0.6$ ($R = \pm 2$) の繰返し载荷でループ挙動を示す定常状態に至った土 (Δ) を、さらに大きな繰返し応力比: $q/p = 1.2 \Leftrightarrow -0.86$ ($R = \pm 3.0$) で繰返し载荷を行うと、増加初期圧縮時 ($\blacksquare$) にはこれまでの最大応力比 $R = 2$ ($q/p = 0.75$) までは定常状態に見られる高い剛性を示すものの、一度その応力比を超えると剛性は大きく減少する。さらにその後の载荷方向の反転時には、定常状態の影響を受けず通常の逆振り载荷と同様の挙動を呈する。また、その後の繰返し载荷では再び定常状態 ($\square$) を向かえ、 $R = \pm 4$ ($q/p = 1.5 \Leftrightarrow -1.0$) ($\bullet$) へ増加するときには再度剛性の減少が確認できる。なお、 $R = \pm 4$ の繰返しせん断において伸張側で破壊強度に達したため、試験を終了した。

一方で、図 - 9 下段の応力比 q/p –間隙比 e 関係からもせん断変形と同様に、定常状態の解消および発達を確認することができる。 $R = \pm 2$ の繰返し载荷で定常化して体積変化がバランスしている土 (Δ) に、繰返し応力比振幅を

増加させると、初期には微量の膨張挙動が見られるものの、载荷方向が一転すると大きな体積圧縮を呈し ($\blacksquare$)、その後数サイクルは大きな体積圧縮を示す。そして、最終的には、再度体積変化が収束する定常状態へ移る ($\square$)。以上のことから、繰返し载荷によって一度定常化状態に至った土も、さらに大きな応力比振幅を与えると、せん断変形ならびに体積圧縮とともに進行して、新たな定常状態へ移行する。紙面の都合上載せていないが、本ケースとは逆の繰返し応力比を減少させていくケースでは、応力比の減少に伴ったせん断変形や体積圧縮は見られず、定常状態も変化しなかった。

(b) ストレスダイレイタンシー関係の遷移

前節の応力–ひずみ関係からは、繰返し応力比増加に伴った、定常状態の解消・発達およびそれに伴うせん断変形・体積変化が確認された。本節では、応力比増加時におけるダイレイタンシー特性の変化について検討を行う。図 - 10 は、定常化時および応力比振幅を増加時の初期サイクルにおけるストレスダイレイタンシー関係の変化を、(a) $R = 2 \rightarrow 3$, (b) $R = 3 \rightarrow 4$ にそれぞれまとめる。それぞれの応

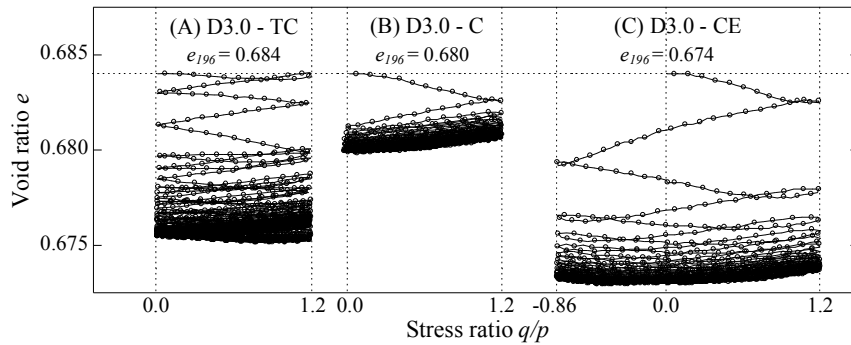


図 - 11 三主応力制御試験機を用いた三軸圧縮片振り繰返し載荷試験と三軸試験機による繰返し載荷試験との間隙比変化の比較

力比振幅で定常状態（Final cycle）に至り、膨張傾向（ストレスダイレイタンスー関係が中央に寄る）を示す土のダイレイタンスー特性は、続くさらに大きな載荷を加えると、中央から離れるように処女載荷時と似たようなダイレイタンスー特性へと移行していることが、図-10(a), (b)の両図から分かる。このダイレイタンスー特性の回復によって、その後の繰返し載荷時に土は再度圧縮することができる。

以上から、繰返し載荷を受けて定常状態に至った土は、これまでに経験していない大きな応力比の載荷を受けると、せん断剛性ならびにダイレイタンスー特性が初期載荷時に戻ること、応力履歴の無いときの処女挙動に似た挙動を呈するため、繰返し応力比が大きくなる度に異なる定常状態まで圧縮する。

3.3 主応力方向の異なる応力比振幅一定繰返しせん断試験 - 両振り（圧縮・伸張）、片振り（圧縮）、三主応力（圧縮）

次に、三主応力制御試験機を用いた片振り繰返しせん断試験を実施し、三軸試験機を用いた繰返し載荷試験の結果と比較することで、応力比振幅一定条件における最大主応力方向の変化が土の変形に及ぼす影響について検証した。図-11 に、三主応力制御による片振り繰返し（圧縮）せん断試験(D3.0-TC)、比較として三軸試験機を用いた片振り・両振り繰返しせん断試験(D3.0-C, D3.0-CE)の応力比 q/p - 間隙比 e 関係を示す。

図から、D3.0-TC は初期単調載荷経路で他の試験と同様に体積膨張を示し、除荷時の等方応力以前に体積圧縮挙動が見られる。また、その後の再載荷時では、同じ片振り試験の D3.0-C は膨張挙動を示すのに対して、D3.0-TC および D3.0-CE は体積圧縮している。その後も同様のことがいえ、これまでの繰返しせん断試験と同様に繰返し回数を重ねると、どの試験もある密度において定常状態を向かえ、体積変化が収束している。

ここで載荷方向の変化量に着目して、 π 面上における載荷方向を表す Lode 角： θ を考えると D3.0-C は $\theta = 0^\circ$ 、D3.0-CE は $\theta = 120^\circ$ 、D3.0-TC は $\theta = 180^\circ$ ずつ載荷毎に方向が変わっている。この方向の変化は、誘導異方性の消散に大きな影響を与え、載荷方向の変化が大きいほど、その

前に形成された異方性（構造）が消失しやすいと考えられる。そのため載荷方向の変化 $3.0-CE > D3.0-TC > D3.0-C$ と大きな順に繰返し載荷毎の体積圧縮量が大きく、最終的に定常化に至る間隙比も小さくなる。

前節までの結果から、土は繰返し載荷を受ける変形が収束する定常状態に至り、それまでに生じる体積変化量は初期密度および繰返し応力比の大きさが影響する。さらに本節の三主応力制御試験機を用いた検討より、上記の二つの影響に加えて、主応力方向の変化も大きな影響を与えることが分かった。

4. 結論

本稿では、豊浦砂を用いた排水条件下での繰返しせん断試験より、繰返し回数の増加に伴う砂の変形定常化特性について検討を行った。以下に、実施された試験より得られた知見をまとめる。

- (1) 土は同一経路を辿る（一定応力比振幅）での繰返しせん断を受けると、せん断および体積剛性が徐々に増加する。このとき、ストレスダイレイタンスー関係は中心に寄り、土はより膨張挙動を示しやすくなる。これにより、やがて体積圧縮量と膨張量がバランスする定常状態に至る。
- (2) ある応力比振幅で定常状態に至った土は、その応力比振幅よりも大きな応力比の載荷を受けると、せん断剛性ならびにダイレイタンスー特性（膨張→圧縮）が回復し、応力履歴の無いときの処女挙動に似た挙動を呈する。そのため、新たな繰返し載荷によって土はさらに圧縮し、異なる密度（間隙比）で定常状態をむかえる。
- (3) 土が緩い（間隙比が大きい）ほど、与える繰返し応力比振幅が大きいほど、主応力方向の変化が大きいほど繰返しせん断開始から定常状態に至るまでの間に生じる密度増加（間隙比の減少）は大きくなる。
- (4) 主応力方向が大きく変化するとき、ある載荷方向に発達した誘導異方性が消失し、そのため体積圧縮が大きくなると考えられる。またその他の試験と

同様に、繰返し載荷回数が増えてくると変形が収束し、定常状態に至る。このような異方性の消散・発達は、(2) の応力比を増大させるケースと類似している。本稿では、Lode 角 θ の変化が 120° の 1 ケースのみの検討であったが、今後は Lode 角の異なる他のケースも行い、主応力方向の変化を含む繰返し載荷時におけるダイレイタンシー特性について検討を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 檜尾正也, 中井照夫, 星川拓哉, 吉田英生 : 単調および繰返し載荷を受ける砂のダイレイタンシー特性と異方性, 地盤工学会論文報告書, Vol.41, No.3, pp.107-124, 2001
- 2) Nakai, T and Mihara, Y : A new mechanical quantity for soils and its application to elastoplastic constitutive models, Soils and Foundations, vol. 24, No. 2, pp. 82-94, 1984.
- 3) Nakai, T. and Matsuoka, H. : Shear behaviors of sand and clay under three-dimensional stress condition, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 2, pp. 26-42, 1983.