

応力履歴が砂の変形特性に及ぼす影響

(The influences of stress histories on the deformation characteristics of sand)

大橋龍起¹，京川裕之²，菊本統³，中井照夫⁴，ホサイン・シャヒン⁵，伴旭将⁶

- 1 名古屋工業大学大学院・創成シミュレーション工学専攻・博士前期課程1年
- 2 東京大学生産技術研究所・基礎系部門・特別研究員
- 3 名古屋工業大学・都市社会工学科・助教 (kikumoto@nitech.ac.jp)
- 4 名古屋工業大学・都市社会工学科・教授
- 5 名古屋工業大学・都市社会工学科・准教授
- 6 名古屋市上下水道局 (元名古屋工業大学大学院・社会工学専攻)

概 要

地盤材料のような粒状体は、過去の応力履歴に応じて内部の粒子構造が変化し、その後異方的な変形特性を示すことが知られている(応力誘導異方性)。この異方性は、特に繰返し载荷時における土の応答に大きく影響を及ぼし、排水条件では締固め、非排水条件では液状化現象など地盤工学の主要な問題と密接に関係している。しかし、誘導異方性はこれまでも異方硬化則や修正応力による記述が試みられているものの、その発達・消散機構は完全には説明されていない。本稿では、応力誘導異方性を適切に表現するモデル化に先立ち、三軸試験機を用いて豊浦標準砂に種々の応力履歴与えた後、単調せん断試験を行い、応力履歴の違いによるせん断剛性およびストレス・ダイレイタンスー関係の変遷をもとに、誘導異方性の発達と消散について検討した。その結果、せん断剛性およびストレス・ダイレイタンスー関係の変遷は過去受けた最大応力比・直前の载荷方向に大きく影響を受けることが示された。また、圧縮側あるいは伸張側に片振りせん断を続けて行うことで誘導異方性の解消が示された。

キーワード：異方性，砂，ダイレイタンスー，繰返し三軸試験，排水せん断試験

1. はじめに

土は応力変化によって粒子間の接触状況が刻々と変わり、これにより様々な方向に異方的な力学特性を示す(誘導異方性)材料である。このような誘導異方性は応力状態によって常に変化するため、地盤挙動を評価する上で常に考慮しなければならない特性であり、地盤の締固めや近年問題となっている液状化などは誘導異方性が密接に関係する典型的な地盤工学問題である。従来、誘導異方性を取り扱う手法として、移動 / 回転硬化モデルがしばしば用いられており、数値解析に導入され、地盤の液状化判定などで実績を上げている。しかしながら、地震時に見られる繰返し载荷時の誘導異方性を適切に表現できているとは言い難く、繰返し载荷における応力反転時の塑性変形の早期の発現などある特定の誘導異方性の影響を評価するに留まっており、現象のメカニズムを本質的に捉えたモデル化はなされていない。そのため、モデル化で使用されるパラメータの意味合いやその発展則は少々煩雑なものになっている。そこで今一度、誘導異方性の影響ならびにその発生機構を要素試験から適切に評価する必要があると思

われる。

著者らのこれまでの検討では、排水せん断を多数回繰り返すとせん断変形や体積変化が膠着する状態について検討を行い、その際にはせん断剛性だけでなく、ダイレイタンスー特性の変化から異方性の影響を評価した¹⁾。本稿ではよりシンプルな条件でこれら異方性の影響を検証するため、排水三軸条件下で単純な応力履歴を与えた砂試料に対して等方圧縮試験およびせん断試験を行い、誘導異方性の発達・消散過程、その後の変形特性への影響を詳細に観察する。

2. 実験に用いた砂供試体および実験概要

本試験で用いた試料は、試料は豊浦標準砂($D_{50} = 0.2\text{mm}$, $e_{\max} = 0.95$, $e_{\min} = 0.58$, $G_s = 2.65$)を用い、水中落下法および所定の密度($e_0 = 0.68$)になるように突き固めを行い、飽和砂供試体(高さ 12.15cm, 直径 5cm の円柱形)を作成した。この密詰め供試体は、等方圧縮時に軸差ひずみ($\epsilon_d = 2/3*(\epsilon_a - \epsilon_r)$)が発生しない理想的な等方変形を示すことから、供試体に形成される初期異方性が有さないことを確

認している。なお本試験では、微小変形時の変形特性に関しても議論を行うため、供試体周囲のメンブレンの粒子間への貫入量を補正することで、正確な体積変化を計測する。

試験はすべて排水三軸条件、 $p=196\text{ kPa}$ の平均有効応力一定下で行った。なお、すべての試験で 98 kPa のバックプレッシャーを一定で与えており、本文中に示す応力はすべて有効応力である。

3. 片振りせん断履歴によって生じる異方性とその変形特性への影響

3.1 単調片振りせん断履歴（等方応力状態まで除荷）がその後の圧縮・せん断挙動に及ぼす影響

単調なせん断履歴がその後の等方圧縮時およびせん断時の土の力学特性に及ぼす影響について検証する。図-1, 2に実施した試験の応力経路をまとめる。ここに、 R は主応力比 σ_1/σ_3 であり、応力経路で示される R および応力比 q/p は、圧縮側と伸張側を区別するために伸張側を負とする。試験は、等方応力状態($p=196\text{ kPa}$)から $R=4$ ($q/p=1.5$), $R=3$ ($q/p=1.2$), $R=2$ ($q/p=0.75$), $R=-4$ ($q/p=-1.0$), $R=-3$ ($q/p=-0.86$), $R=-2$ ($q/p=-0.6$)の計6種類の片振り圧縮・伸張せん断履歴を与え等方応力状態まで除荷した後(経路A→B), $p=196\text{ kPa}$ から $p=686\text{ kPa}$ まで等方的な応力増分を与える(経路B→C)または三軸圧縮せん断試験(経路B→D)を行う。

まず、単調なせん断履歴によるその後の圧縮挙動への影響について検討する。図-3に示した7種類のプロットは、圧縮・伸張側にそれぞれ主応力比 $R=2, 3, 4$ まで単調に片振りせん断履歴を与えた砂と履歴を与えなかった砂の等方圧縮時の $\varepsilon_a-\varepsilon_r$ 関係を示している。図より、せん断履歴を受けていない砂は等方的に圧縮するのに対して、せん断履歴を受けた土は等方的な応力増分に対して異方的に振舞い、せん断時に最大主応力が作用した方向に固くなる。また、そのような相対的な剛性変化の程度は、せん断時に与えた応力比が大きいほど顕著である。よって、異方性の発達方向や程度は過去に受けたせん断履歴の方向や応力比によることがわかる。ただし、圧縮側にせん断履歴を受けた土は、圧縮応力の増加に伴ってひずみ経路の傾きが等方的変形($\delta\varepsilon_a = \delta\varepsilon_r$)を表す 45° 勾配に近づくことから、等方的な応力増加によって誘導異方性は徐々に解消することもわかる。

続いて、図-3と同様の1サイクルの片振りせん断履歴を受けた砂のその後のせん断特性について比較する。図-4, 5にそれぞれ圧縮側、伸張側に片振りせん断履歴を与えた後の三軸圧縮せん断試験(逆振り載荷試験)の結果を示す。両図中の(a)図には応力比 q/p ～軸差ひずみ ε_d ～体積ひずみ ε_v 関係、(b)図にはストレス・ダイレイタンス関係(応力比 q/p ～全ひずみ増分比 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_d)$ 関係:以降SD関係と記述)を示す(以後、全ての試験結果において同様の整理を行う)。なお、弾塑性構成則を展開する際には通常、塑性ひずみ増分についてSD関係を仮定するが、試験では全ひ

ずみ増分について実測値を整理していることに注意されたい。また、白抜きプロットは応力履歴の無い等方性試料の単調せん断試験の結果である。

図-4(a)より、過去に受けた応力履歴と同一方向に再載荷される場合、載荷初期のせん断剛性が高くなっており、特に高い応力比のせん断履歴を受けた試料ほど高い応力比

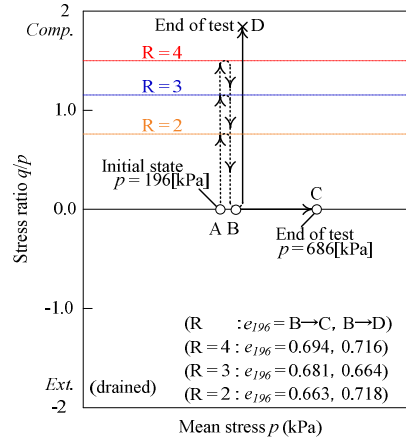


図-1 単調片振りせん断履歴(圧縮)を与えた砂の三軸圧縮せん断試験および等方圧縮試験 応力経路

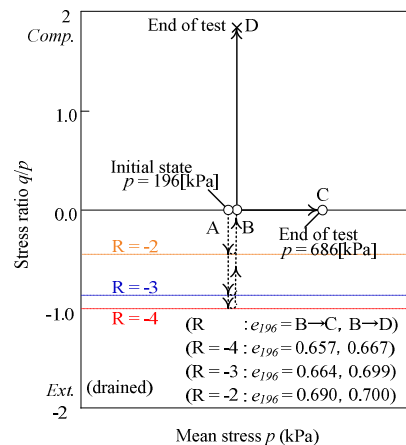


図-2 単調片振りせん断履歴(伸張)を与えた砂の三軸圧縮せん断試験および等方圧縮試験 応力経路

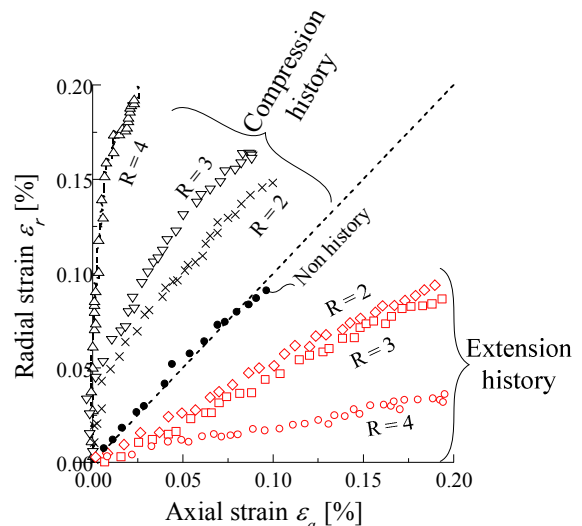


図-3 等方圧縮載荷試験 $\varepsilon_a-\varepsilon_r$ 関係

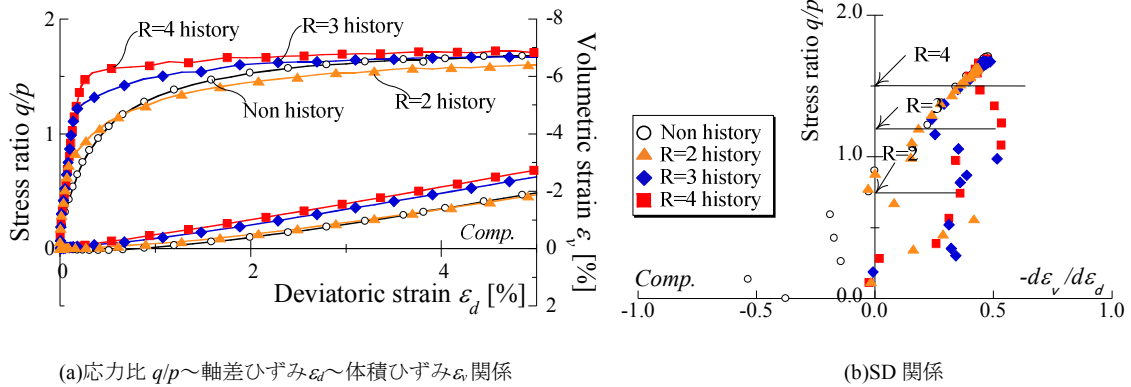


図-4 単調片振りせん断履歴（圧縮）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験

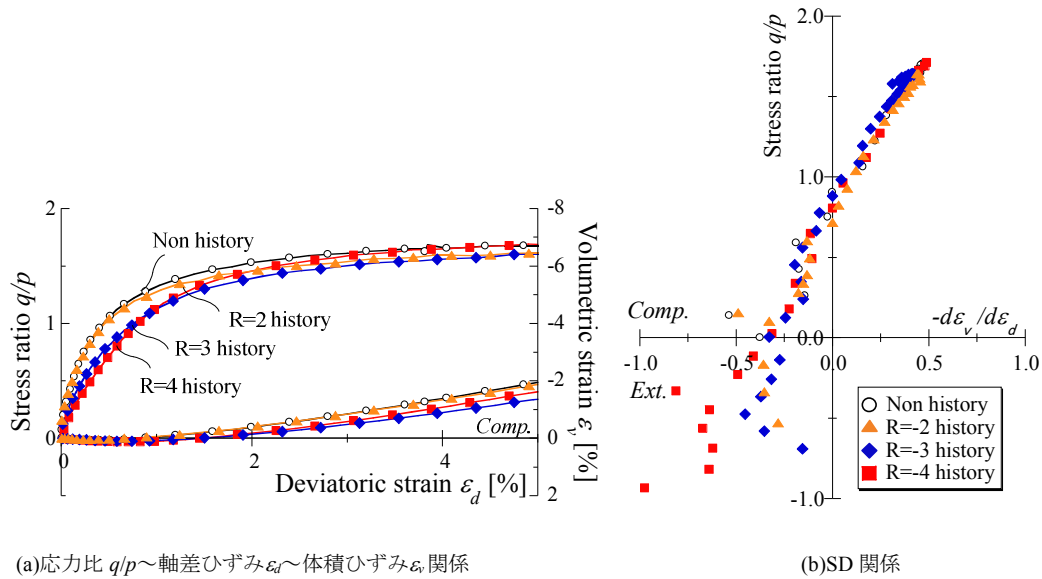


図-5 単調片振りせん断履歴（伸張）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験

まで異方性が解消しないことが分かる。ただし、応力比の増加に伴ってせん断変形が進行して、最終的には単調せん断時と同様の破壊強度に至っている。このときのダイレイタンシー特性（図-4(b)）は、過去に受けた最大応力比以前では履歴の無い単調せん断時の S-D 関係に比べて膨張傾向にあるが、以前に受けた最大応力比に達した以降は履歴の無い単調荷荷の結果と同じユニークな S-D 関係が得られる。一方で、先に与えた応力履歴とは逆方向に荷荷するケース（図-5(a), (b)）では、過去に受けた応力履歴が大きいほど、等方応力状態を跨ぐ逆振り荷荷初期のせん断剛性は低下するが、上述の同一方向への再荷荷時ほど剛性の変化に顕著な差は見られず、最終的な破壊強度は再荷荷と同様に応力履歴に依らないことが分かる。またダイレイタンシー特性は、等方応力以前ではせん断履歴が大きいほど圧縮傾向にあるが、等方応力以降は履歴の無い単調せん断試験の結果とはほぼ一致する。

3.2 単調片振りせん断履歴（異方応力状態まで除荷）がその後のせん断挙動に及ぼす影響

次に 3.1 と同様に一度主応力比 $R = 4$ までせん断した後、 $R = 2, 3$ の異方応力状態まで除荷した後の再荷荷試験より、

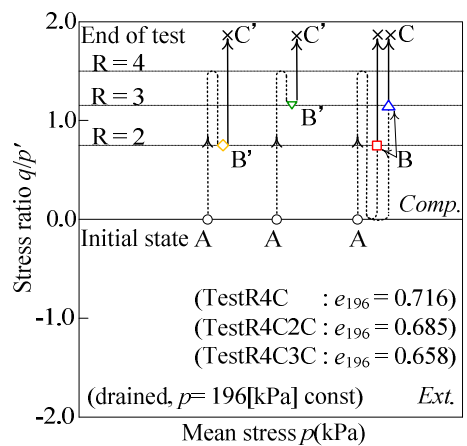
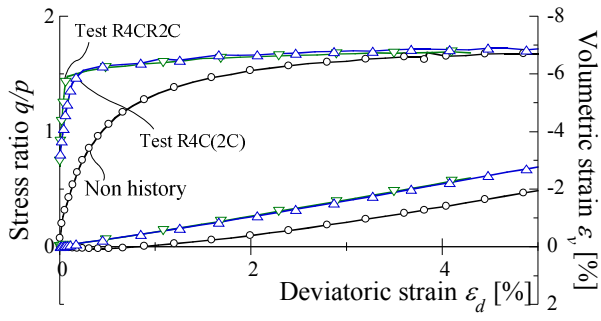
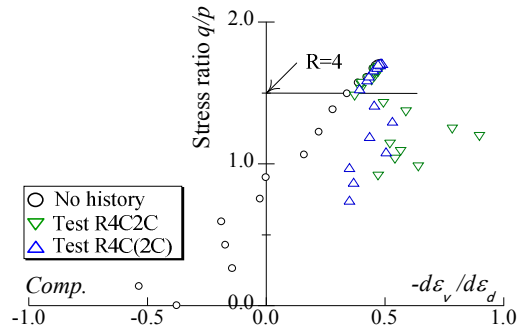


図-6 単調片振りせん断履歴（異方応力状態まで除荷）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験 応力経路

除荷幅による異方性の変化を検討する。実施した試験経路（図-6）は、主応力比 $R = 4$ まで三軸圧縮せん断を行った後、各主応力比（ $R = 3, 2$ ）まで除荷し（経路 A → B'）、その後三軸圧縮せん断を行う（経路 B' → C'）。図-7, 8 に $R = 2, 3$ からの再荷荷（経路 B' → C'）の結果をそれぞれ示す。両図には比較のために 3.1 節の図-4 で示した応力履歴 $R =$

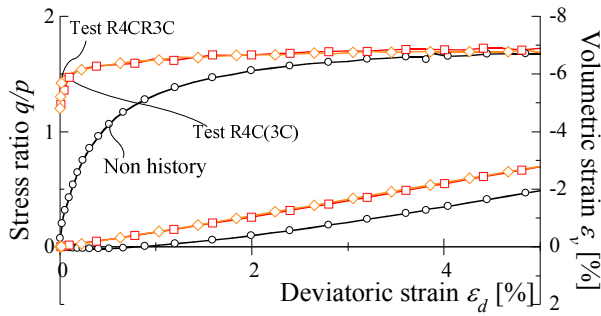


(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ε_d ~ 体積ひずみ ε_v 関係

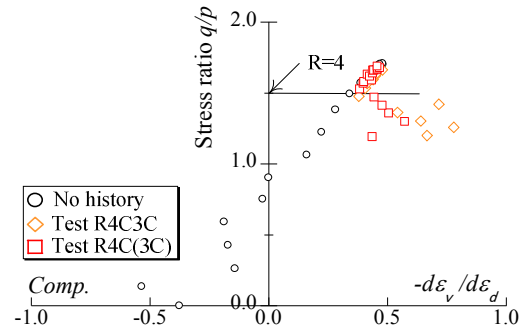


(b) SD 関係

図-7 単調片振りせん断履歴（伸張）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験



(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ε_d ~ 体積ひずみ ε_v 関係



(b) SD 関係

図-8 単調片振りせん断履歴（伸張）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験

4 を与えて等方応力状態まで除荷した再载荷三軸圧縮せん断試験の結果の $R = 2, 3$ からの結果（経路 B→C）を同時に示す。

図-7, 8 の両図から、一度応力履歴を与えた後に異方応力状態まで除荷したケースの方が等方応力状態まで除荷するよりも、再载荷時のせん断剛性が高くなり、SD 関係もより膨張傾向を示していることから、異方性による影響が除荷幅の大きさに伴って消散していることが分かる。また、その膨張傾向は過去に受けた最大応力比である $R = 4$ までであり、 $R = 4$ 以降は履歴の無い単調圧縮せん断試験の結果と一致している。

3.3 非単調片振りせん断履歴（圧縮）がその後のせん断挙動に及ぼす影響

3.1 と 3.2 では片振りせん断履歴を一度与えたケースで誘導異方性の影響を検討した。本節では、三軸圧縮側に2度のせん断履歴を与え、その後のせん断挙動への影響を調べる。その際、 $R = 2, 4$ の異なる応力履歴を順序を変えて与えたケースを行い、応力履歴の順序による異方性の変化を検討する。試験の応力経路（図-9）は、

- ① 等方応力状態から圧縮側に主応力比 $R = 4$ の応力履歴を与えた後、再度圧縮側に $R = 2$ の応力履歴を与えたケース、
- ② ①のケースとは逆に、圧縮側に $R = 2$ の応力履歴を与えた後、再度圧縮側に $R = 4$ の応力履歴を与えたケース、
- ③ 圧縮側に $R = 4$ の応力履歴を二度与えたケース、以上の3ケースの異なるせん断履歴を与えた（経路 A→C）後、

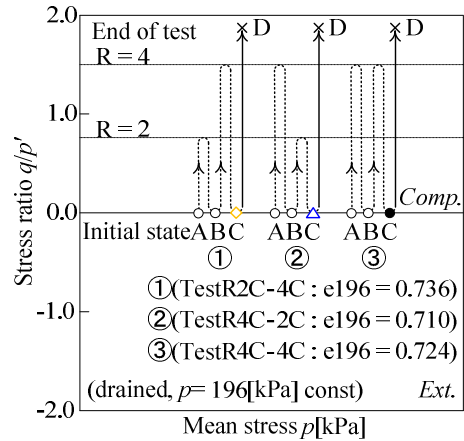
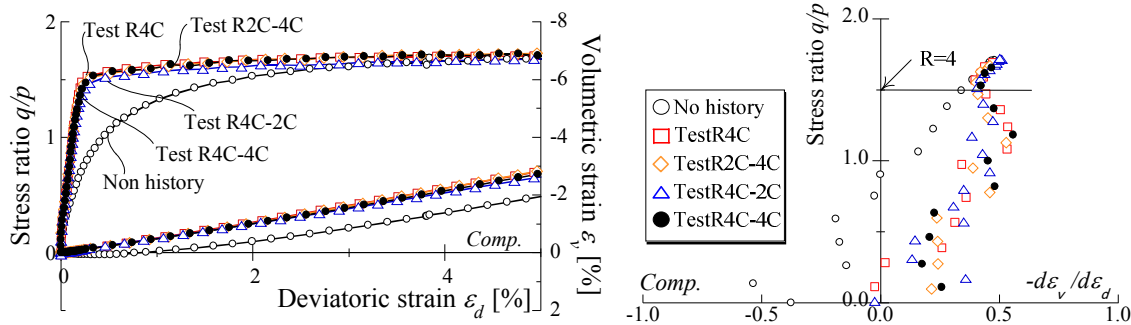


図-9 非単調片振りせん断履歴（圧縮）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験 応力経路

三軸圧縮せん断を行った（経路 C→D）。図-10の試験結果（経路 C→D）には、比較のために応力履歴の無い単調载荷試験、3.1 節の図-4 で示した応力履歴 $R = 4$ を与えた再载荷三軸圧縮せん断試験の結果を同時に示す。

図-10(a), (b)両図より、2度のせん断履歴を与えたどの試験パターンも 3.1 で示した圧縮側に応力比 $R = 4$ のせん断履歴を一度与えた結果に似た応力ひずみ関係になり、SD 関係も過去に受けた最大応力比である $R = 4$ までは膨張傾向を示し、 $R = 4$ を越えるとその影響は消失してせん断履歴を受けていない試料と同じ関係に近づく。よって、同じ



(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ϵ_d ~ 体積ひずみ ϵ_v 関係 (b) SD 関係
 図-10 非単調片振りせん断履歴（圧縮）を与えた砂の三軸圧縮せん断試験

載荷方向に異なる応力比の繰返しせん断履歴を与える場合、載荷順序に依らず、過去に受けた最大応力比 ($R = 4$) が土の異方性を支配することが分かる。

以上 3.1~3.3 で示された種々の片振りせん断履歴によって発達する異方性についてまとめると、せん断時には最大主応力方向に相対的に剛性を増加させるような誘導異方性が発達する。このため、過去のせん断と同じ方向に再せん断する場合には硬く、逆振り側にせん断する場合には柔らかいせん断挙動を呈する。このときダイレイタンシー特性は、再載荷時では膨張傾向、逆振り載荷時では圧縮傾向を示す。このような異方性の程度は、除荷時に少なからず消散するが、せん断履歴の最大応力比が高いほど大きく、過去に経験した応力経路下では異方性の影響が明確にあらわれる。ただし、再せん断あるいは逆振りせん断を続けて、過去に受けたことの無い応力経路に差し掛かると、その後はせん断履歴によらずユニークな変形挙動（ストレスダイレイタンシー特性）を呈する。

4. 両振りせん断履歴によって発達・消散する異方性とその変形特性への影響

4.1 単調・非単調両振りせん断履歴がその後のせん断挙動に及ぼす影響

本節では、単調せん断によりいったんある方向に発達した異方性が、等方応力を跨いだ逆振り載荷によってどのように消散するかをその後の三軸圧縮せん断挙動から読み取る。与えた応力経路は（図-11）は、等方応力状態から伸張側に主応力比 $R = -4$ 、続いて圧縮側に $R = 4$ の応力履歴を与えたケース、それとは逆に先に圧縮側 $R = 4$ 、続いて伸張側に $R = -4, -3, -2$ の応力履歴を与えた 3 ケースの計 4 ケースの応力履歴を与え（経路 A→C）、その後三軸圧縮せん断試験を行う（経路 C→D）。図-12 に示す結果（経路 C→D）には、図-10 と同様に応力履歴の無い単調載荷試験、応力履歴 $R = 4$ を与えた再載荷三軸圧縮せん断試験の結果を比較のために示す。

図-12 より、はじめに伸張側 $R = -4$ 、続いて圧縮側 $R = 4$ にせん断履歴を与えた試験（Test R4E-4C）と圧縮側にせん断履歴 $R = 4$ を与えた結果（Test R4C）を比較すると、せん断剛性ならびに SD 関係に大きな差は見られない。また 3.1 の図-5 の結果から、一度伸張側に応力履歴を与えた土は、その後載荷方向を逆振りの圧縮側に変化させるとせん断剛性が大きく低下する（軸方向に軟かい挙動を呈する）ことが示されたことを考慮すると、一度伸張側に発達した誘導異方性は、その後の圧縮側への載荷で解消し、その後の変形特性は直前の（圧縮側の）応力履歴の影響を強く受けていると考えられる。次に載荷方向を圧縮側 ($R = 4$) から伸張側 ($R = 2, 3$ or 4) に逆振り載荷履歴を与えたケース（Test R4C-2E, Test R4C-3E, Test R4C-4E）について検討を行う。結果より、逆振り伸張側へのせん断応力比が大きいほど、その後の載荷ではせん断剛性は低くなり、ダイレイタンシー特性も応力履歴の無い場合（No history）に近い。伸張 $R = -4$ → 圧縮 $R = 4$ と履歴を与えた Test R4E-4C とは載荷順序が逆（圧縮→伸張）になっているだけであり、はじめの圧縮履歴によって発達した異方性が続く伸張側への載荷で消散していることは容易に理解できる。ただし、3.1 の図-5 で示された伸張側への履歴を与えたケースとは異なり、一度圧縮側に履歴を与えた今回のケースではその後の載荷挙動は、履歴を与えない単調載荷の結果よりもせん断剛性は高く、ダイレイタンシー特性の

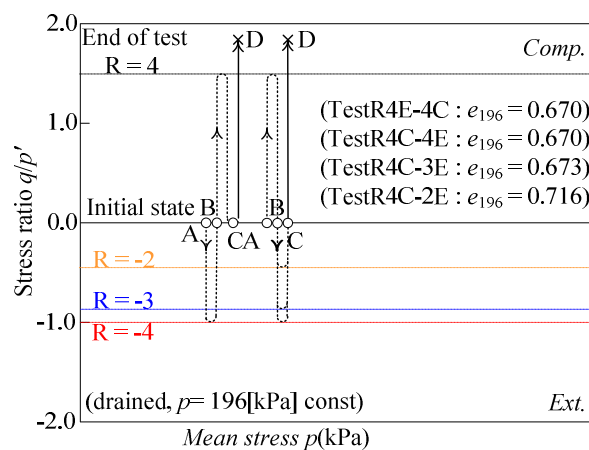
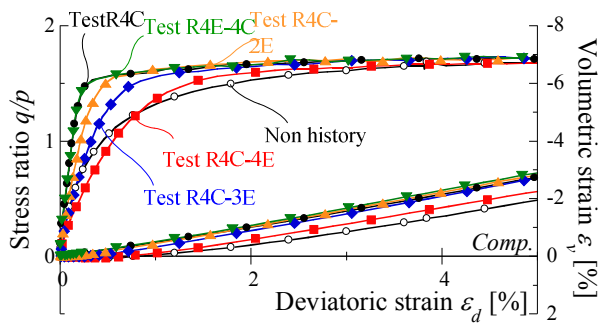
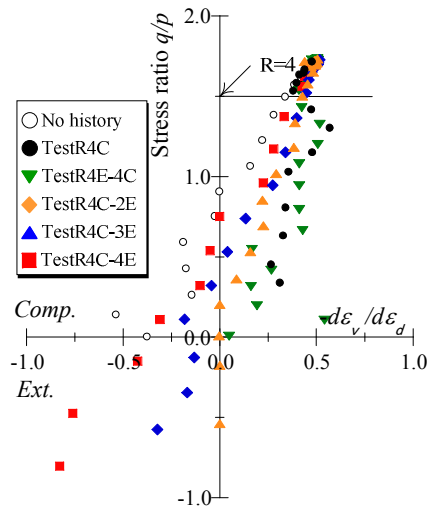


図-11 逆振りせん断履歴を与えた砂の三軸圧縮せん断試験 応力経路

断履歴 $R = 4$ を与えた結果（Test R4C）を比較すると、せん断剛性ならびに SD 関係に大きな差は見られない。また 3.1 の図-5 の結果から、一度伸張側に応力履歴を与えた土は、その後載荷方向を逆振りの圧縮側に変化させるとせん断剛性が大きく低下する（軸方向に軟かい挙動を呈する）ことが示されたことを考慮すると、一度伸張側に発達した誘導異方性は、その後の圧縮側への載荷で解消し、その後の変形特性は直前の（圧縮側の）応力履歴の影響を強く受けていると考えられる。次に載荷方向を圧縮側 ($R = 4$) から伸張側 ($R = 2, 3$ or 4) に逆振り載荷履歴を与えたケース（Test R4C-2E, Test R4C-3E, Test R4C-4E）について検討を行う。結果より、逆振り伸張側へのせん断応力比が大きいほど、その後の載荷ではせん断剛性は低くなり、ダイレイタンシー特性も応力履歴の無い場合（No history）に近い。伸張 $R = -4$ → 圧縮 $R = 4$ と履歴を与えた Test R4E-4C とは載荷順序が逆（圧縮→伸張）になっているだけであり、はじめの圧縮履歴によって発達した異方性が続く伸張側への載荷で消散していることは容易に理解できる。ただし、3.1 の図-5 で示された伸張側への履歴を与えたケースとは異なり、一度圧縮側に履歴を与えた今回のケースではその後の載荷挙動は、履歴を与えない単調載荷の結果よりもせん断剛性は高く、ダイレイタンシー特性の



(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ϵ_d ~ 体積ひずみ ϵ_v 関係



(b) SD 関係

図-12 逆振りせん断履歴を与えた砂の三軸圧縮せん断試験

変化もすぐには解消していないことが分かる。つまり、土の誘導異方性は、直前の荷荷に影響を受けるが、それ以前の荷荷で発達した誘導異方性の解消にも大きく依存する。

4.2 三次元的に発達する誘導異方性

ここで、三軸圧縮 / 伸張履歴 ($R = 4, -4$) を順番を変えて与えた試験をもう一度考えてみる。三軸伸張 ($R = -4$) 後、三軸圧縮履歴 ($R = 4$) を与えた Test R4E-4C では、一度だけ圧縮履歴を与えた Test R4C の結果と一致していることから、はじめの伸張履歴の影響は消失し、続く圧縮履歴の影響が土の異方性を支配する。一方、三軸圧縮 ($R = 4$) 後、三軸伸張履歴 ($R = -4$) を与えた Test R4C-4E では、履歴無しの一軸荷荷 (No history) との比較から、せん断変形、ダイレイタンス特性とともに、直前に $R = -4$ の伸張履歴を与えたにも関わらず圧縮履歴の影響が残っている。つまり、同じ主応力比を与えた場合、伸張よりも圧縮せん断履歴が残り易いと考えられる。このような異方性の発達の差は、図-3 で示す圧縮・伸張履歴を与えた後の等方圧縮試験において、圧縮履歴を与えたものほど異方的な変形を示していることから確認できる。さて、小田²⁾は2次元光弾性実験から、異方応力状態の土は最大主応力 (σ_1) 方向にコラムを形成するように土粒子配列が変化することを示しており、その影響を受けて土には異方的な剛性 (σ_1 方向に強い構造) を示す誘導異方性が発達する。このことから、伸張側 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) の荷荷では中間主応力と最大主応力が一致するときは特定の方向へのコラムは形成されにくいと考えられるため、圧縮側 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) の1方向に形成されるコラムよりその影響が小さくなる。つまり、誘導異方性の影響を評価する際には、単に与えられた最大応力比だけでなく、中間主応力の大きさを考慮した三次元的な応力状態において適切に評価する必要があると考える。

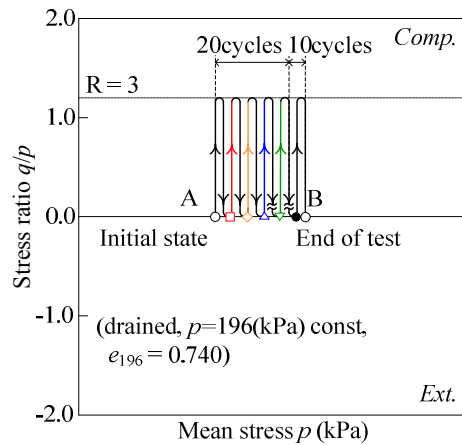
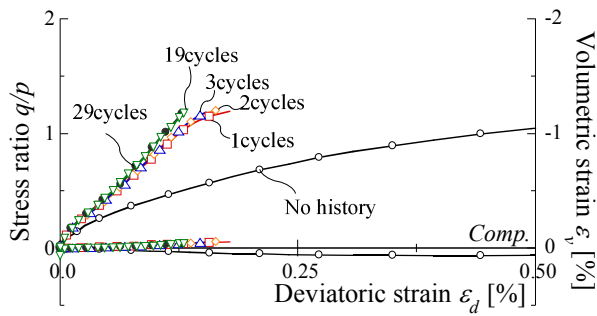


図-13 繰返し片振りせん断試験 応力経路

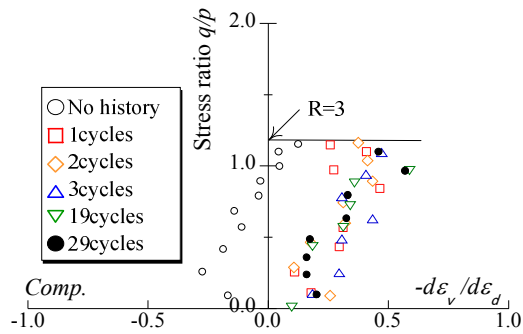
5. 複数回の片振り・両振りせん断試験時における異方性の発達とその変形特性への影響

次に所定の主応力比振幅一定で繰返し三軸せん断試験を行い、同じせん断履歴を与えられた際の、土の誘導異方性の蓄積 / 解消ならびにその変形特性への影響を検証する。試験経路 (図-13, 15) は、これまでの試験と同様に等方応力状態 ($p = 196 \text{ kPa}$) から圧縮側のみの片振り ($R = 0.0 \Leftrightarrow 3.0$)、圧縮・伸張側に両振り ($R = -3.0 \Leftrightarrow 3.0$) の2種類の複数回の繰返し三軸せん断試験を行う。これらの試験は、1サイクルのせん断でのせん断変形、体積変化が閉じた定常状態³⁾まで繰返しせん断を行った。図-14 に片振り繰返し三軸せん断試験 ($R = 0 \Leftrightarrow 3$)、図-16 に両振り繰返し三軸せん断試験 ($R = -3 \Leftrightarrow 3$) の各サイクルにおける圧縮方向荷荷時の結果を示す。なお、19 および 29 サイクル履歴を与えた砂は定常状態にある。

図-14 より、圧縮片振り繰返しせん断時には、繰返し回数増加に伴い、せん断剛性はより高くなり、SD 関係は多少のバラつきはあるが膨張傾向が大きくなる。また、こ



(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ε_d ~ 体積ひずみ ε_v 関係



(b) SD 関係

図-14 繰返し片振りせん断試験

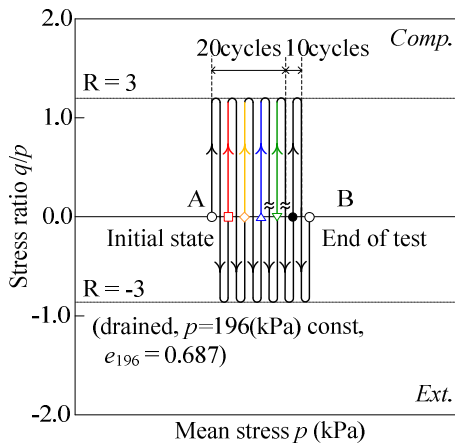


図-15 繰返し両振りせん断試験 応力経路

のような繰返し載荷時における力学特性の変化は、いずれ定常状態に至る。このことから、4.1 で示したように誘導異方性が解消し切らない圧縮側での繰返しせん断では、繰返し回数の増加にともない圧縮側に異方性が蓄積し、土は載荷状態によって決まる一意的な定常状態に至ると考えられる。

一方、図-16 に示す圧縮・伸張側への両振り繰返しせん断試験では、伸張側へのせん断過程を含むため異方性の解消が作用し、図-14 に示される片振り載荷試験よりも、繰返し回数に対するせん断剛性の増加、ダイレイタンスの膨張側の遷移は緩慢であるが、最終的には定常状態に至ることが分かる。またこのとき、圧縮側だけではなく、伸張側も同様の定常状態に至っていることに注意されたい。つまり、これまでである一方向に対する発達・消散を議論してきた誘導異方性は、実際は応力経路に応じてあらゆる方向に発達・消散を繰り返しながら分布、蓄積していくと考えられる。

図-17 は、上記の片振り繰返しせん断および両振り繰返しせん断で定常状態に至った (29 サイクル) 後の三軸圧縮時の応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ε_d ~ 体積ひずみ ε_v 関係を示している。図から、どちらの載荷条件でも定常化に至っているため大きなせん断剛性を示すが、図-3, 4 と同様に伸張側からの逆振りとなる両振り繰返し試験 ($R = -3 \leftrightarrow 3$) は、

圧縮側の再載荷である片振り繰返しせん断試験 ($R = 0 \leftrightarrow 3$) に比べてそのせん断剛性が低くなっており、たとえ定常化に至っていたとしても、土は直前の載荷の影響を受けることが分かる。

6. 結論

本稿では、三軸圧縮・伸張方向に種々のせん断履歴を与えた豊浦砂を用いたせん断・等方圧縮試験 (等方的に応力増分を与えた) より、応力履歴によって発達・消散する誘導異方性とその変形特性への影響について検討を行った。以下に試験結果より得られた誘導異方性のモデル化で考慮すべきポイントをまとめる。

- 1) 片振りせん断履歴によって発達する誘導異方性
土はせん断時に最大主応力方向に相対的に剛性を増加させるような誘導異方性が発達するため、その後等方的な応力増分を与えると誘導異方性が発達した方向は相対的に変形が生じにくくなる。せん断挙動に関しては、過去のせん断と同じ方向に再せん断する場合には硬く、逆振り側にせん断する場合には柔らかいせん断挙動を呈する。このときダイレイタンス特性は、再載荷時では膨張傾向、逆振り載荷時では圧縮傾向を示す。このような異方性の程度は、除荷時に少なからず消散するが、せん断履歴の最大応力比が高いほど大きく、過去に経験した応力経路下では異方性の影響が明確にあらわれる。ただし、過去に受けたことの無い応力経路下ではせん断履歴によらずユニークな変形挙動 (ストレスダイレイタンス特性) を呈する。
- 2) 両振りせん断履歴によって発達・解消する誘導異方性
逆振り載荷のように最大主応力方向を変化させたせん断履歴を与えると土の誘導異方性は、直前の載荷に強く影響を受けるが、それ以前の載荷で発達した誘導異方性の解消にも大きく依存する。また同じ主応力比履歴を与える載荷であっても、誘導異方性の程度は中間主応力の相対的な大きさに

影響を受けるため、三軸圧縮条件では最大主応力と中間主応力が一致する三軸伸張条件よりも強固な異方性が発達する。

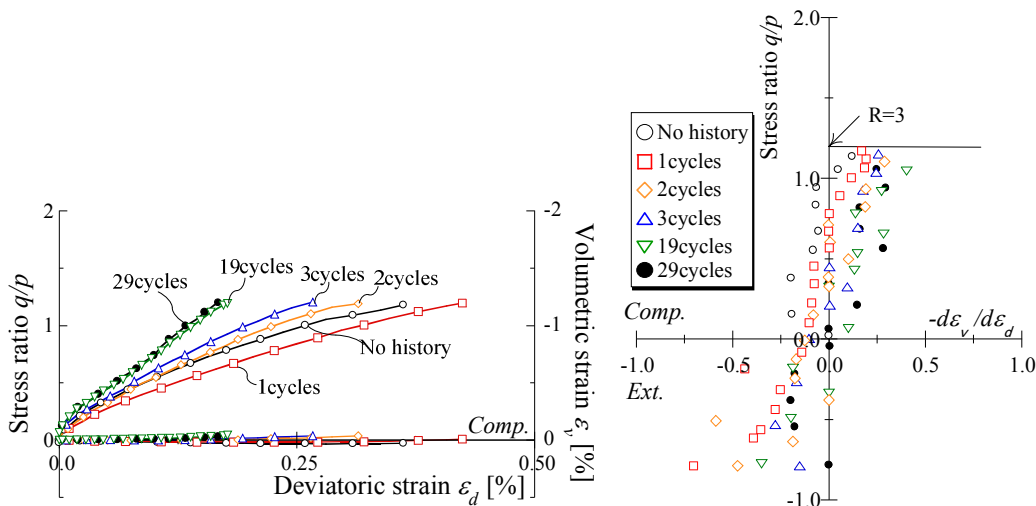
3) 多数回の繰返しせん断によって膠着・分布する誘導異方性

応力比一定の多数回の繰返し载荷においては、繰返し回数の増加にともない異方性が蓄積することで、最終的に異方性の発達が収束し、载荷状態によって決まる一意的な定常状態をむかえる。このとき誘導異方性はある一方方向に蓄積するのではなく、応力経路に応じてあらゆる方向に発達・消散を繰返しながら分布、蓄積していくと考えられる。

以上の結果を踏まえ、今後は Rendulic 面外の三次元的な応力状態を制御できる三主応力制御試験機、さらには主応力軸の回転を考慮した中空ねじり試験機を用いた排水試験から、より広範な応力履歴によって生じる誘導異方性の影響について検討を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 檜尾正也, 中井照夫, 星川拓哉, 吉田英生: 単調および繰返し载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) Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Konishi, J. (1985): Stress-induced anisotropy in granular masses, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 3, 85-97.
- 3) 山崎光, 伴旭将, 京川裕之, 菊本統, 中井照夫, 石原隆寛: 砂の繰返し载荷特性における応力比・密度・主応力方向の影響, 第22回中部地盤工学シンポジウム



(a) 応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ϵ_d ~ 体積ひずみ ϵ_v 関係

(b) SD 関係

図-16 繰返し両振りせん断試験

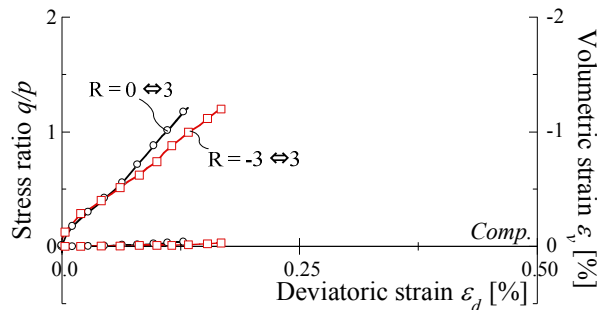


図-17 繰返し片振り / 両振りせん断試験の定常状態における
応力比 q/p ~ 軸差ひずみ ϵ_d ~ 体積ひずみ ϵ_v 関係