

# 繰返しせん断方向が飽和砂の沈下・強度特性に及ぼす影響

松田博<sup>1</sup>・岡田尚樹<sup>2</sup>・高宮晃一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山口大学工学部 (〒755-8611 山口県山口市常盤台2-16-1)

E-mail: hmatsuda@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>山口大学大学院 (〒755-8611 山口県山口市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>山口大学工学部 (〒755-8611 山口県山口市常盤台 2-16-1)

地震時に地盤内で生じる加速度の方向は一定ではなく、地盤内の土要素に作用する繰返しせん断は多方向に生じる。そこで、水平面上の直角2方向から独立にせん断変位を供試体に与えることによって水平面上の種々の方向に繰返しせん断を行うことが可能な多軸単純せん断試験機を用い、飽和砂について繰返しせん断中の有効応力減少、繰返しせん断後に生じる沈下に及ぼす繰返しせん断方向の影響について調べた。その結果、繰返しせん断中の有効応力減少量にはせん断方向が影響すること、繰返しせん断後に生じる沈下量および再圧密後の静的強度は繰返しせん断中の有効応力減少量に依存することがわかった。

**Key Words :** cyclic shear, effective stress, settlement

## 1. はじめに

地震時に地盤内で生じる加速度の方向は一定ではないため、地盤内の土要素に作用する繰返しせん断も多方向に生じる。図-1 は兵庫県南部地震において測定された加速度波形をもとに得た地盤内のせん断ひずみの履歴曲線の一例を示したものである<sup>1)</sup>。明らかにせん断ひずみは卓越した方向が見られるものの、履歴曲線は楕円形状を呈している。このような繰返しせん断方向が砂地盤の沈下に及ぼす影響に関して、Pyke 等<sup>2)</sup>は水平面上の直角2方向から繰返し載荷を同時に行った時に生じる砂層の沈下は、各方向からそれぞれ独立に繰返し載荷を行っ

て得られる沈下の和に等しいことを示した。一方、Nagase 等<sup>2)</sup>は、繰返しせん断後に生じる砂層の沈下に及ぼす繰返し載荷方向の影響は無いと述べており、Pyke 等の結果と異なっている。また、その相違についての明確な原因についても明確にされていない。そこで、本研究においては多方向繰返し単純せん断試験機を用いて、飽和砂供試体に対して多方向繰返しせん断試験を行い、繰返しせん断中の有効応力減少、繰返しせん断後の沈下および強度特性に及ぼすせん断方向の影響を調べた。

## 2. 実験装置及び実験方法

用いた装置は多軸単純せん断試験機である。試験装置の概要を示したものが図-2 である。この装置は水平面上の直角2方向から独立して繰返しせん断ひずみを供試体に与えることが可能である。供試体の直径は75mm、高さは20mm である。せん断力は直角2方向に設置した電気油圧サ - ボシステムによって与えた。各サーボシステムは独立して制御可能であることから、供試体には任意の方向に対して、任意の波形の繰返しせん断変形を与えることができる。また、鉛直応力は空気圧サ - ボシステムによって与えた。

用いた試料は豊浦砂 ( $\rho_s = 2.631\text{g/cm}^3$ ,  $e_{\max} = 0.971$  ,

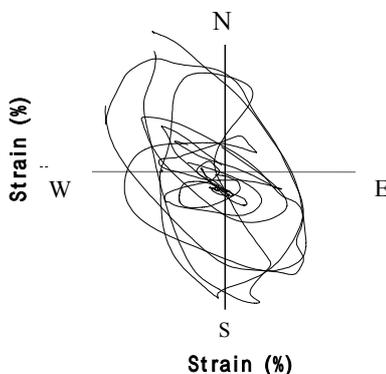


図-1 兵庫県南部地震時の地盤のせん断ひずみの履歴<sup>1)</sup>

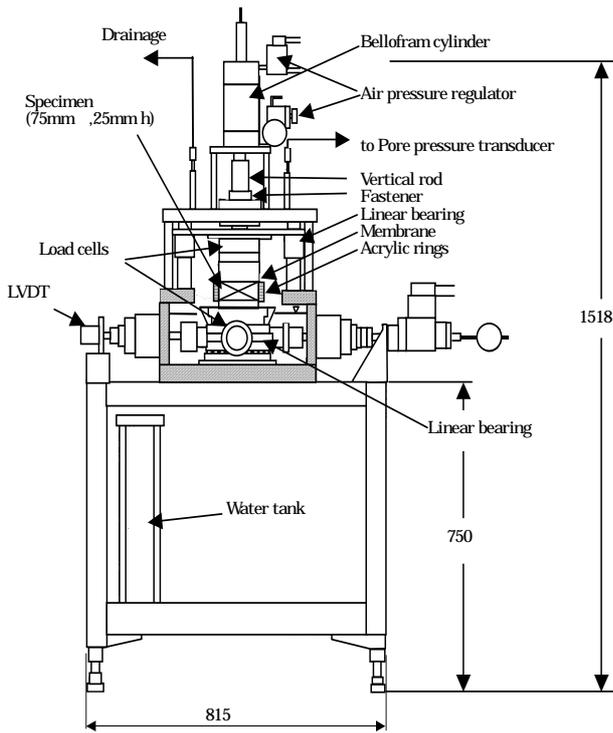


図-2 多軸単純せん断試験装置

$e_{min} = 0.658$ )である。まず、飽和状態の豊浦砂を相対密度 60%, 70%, 80%に調整し、せん断箱に詰めた。その後 49 kPa で約 15 分間予圧密した。繰返しせん断中は定体積条件とするために、鉛直荷重載荷用の軸棒を拘束した。繰返しせん断後は、鉛直荷重載荷用の軸棒の拘束を解き、圧密圧力 49 kPa で再圧密した。再圧密期間は 15 分とし、沈下量の経時変化を測定した。一方、繰返しせん断による攪乱が飽和砂の強度に及ぼす影響を明確にするために予圧密後と再圧密後に静的せん断試験(せん断ひずみ速度 1%/min)を行った。

繰返しせん断の波形はサイン波であり、以下に示す 4 ケ - スの載荷方法によって実験を行った。

CASE ；X 方向(水平直角 2 方向を X 方向, Y 方向と定義する)から所定の回数(n)のせん断変位を与える。

CASE ；X, Y 両方向から位相差  $=90^\circ$  として所定の回数(n)のせん断変位を与える。(  $=90^\circ$  の時を特に Gyrotory shear と呼ぶ。)

CASE ；X 方向から所定の回数(n)の繰返しせん断変位を与えた後, Y 方向から同回数(n)の繰返しせん断変位を与える。

CASE ；X 方向から回数(2n)の繰返しせん断変位を与える。

各ケ - スのせん断パターンを概念的に示したものが

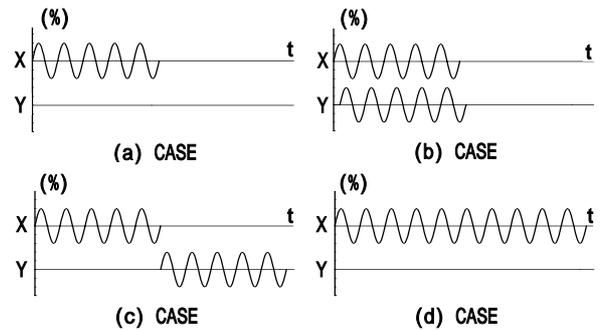


図-3 繰返しせん断方法

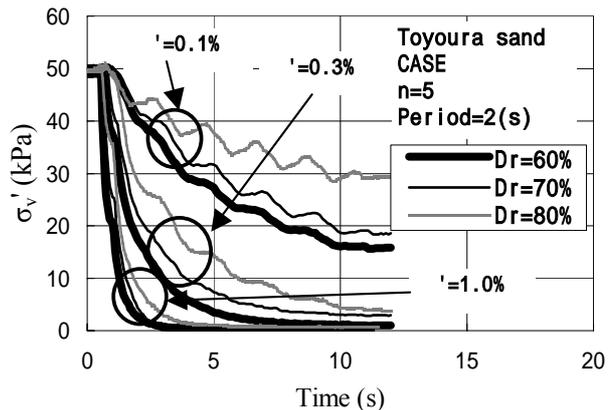


図-4 繰返しせん断によって生じる鉛直有効の減少

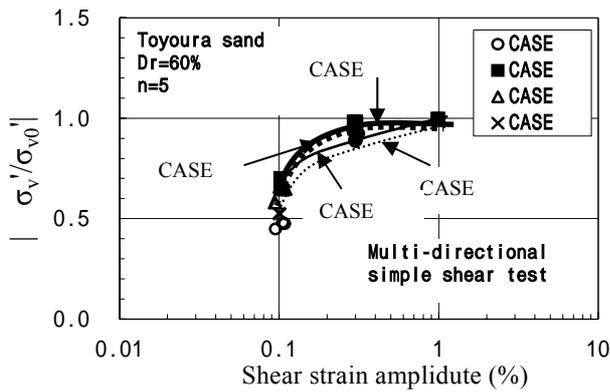
図-3である。なお、いずれの場合も繰返しせん断の周期は2秒とし、ひずみ振幅は0.1% ~ 1.0%の間で変化させた。また、ひずみ振幅の定義としてはCASE , CASE , CASE の場合、片振幅の大きさを供試体高さで除した値をせん断ひずみ とし、CASE においては供試体下端面(供試体上端面の水平変位は固定されている)の変位を測定し、静止状態における位置から軌跡の最遠点までの距離を供試体高さで除した値をせん断ひずみ 'とした。

### 3. 実験結果

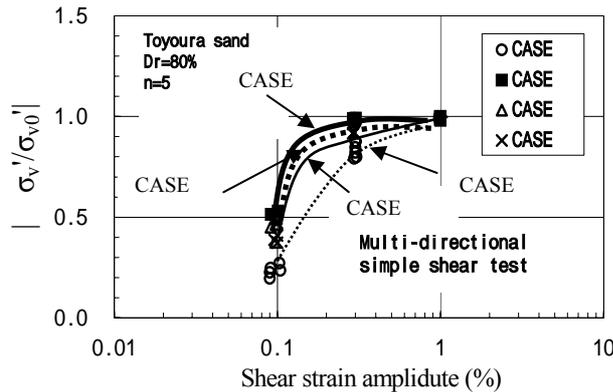
(1) 有効応力減少に及ぼす繰返しせん断方向の影響

図-4 は、相対密度 60, 70, 80%についての繰返しせん断中の鉛直有効応力の経時変化を示したものである。同図から明らかなように、繰返しせん断ひずみを受けることにより鉛直有効応力は減少し、せん断ひずみ振幅が大きいほど有効応力減少量が大きいことがわかる。また、相対密度が小さいほど鉛直有効応力の減少量は大きくなっている。

図-5(a), (b)は、繰返しせん断終了時における有効応力減少比  $|\Delta\sigma'_v / \sigma'_{v0}|$  とせん断ひずみ振幅の関係を示したもので、それぞれ  $Dr=60\%$  および  $80\%$  についての結果で



(a) Dr=60%



(b) Dr=80%

図-5  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v0}|$ とせん断ひずみ振幅の関係

ある．同図より，有効応力減少に及ぼす繰返しせん断方向の影響が確認できる．すなわち，同一振幅で比較した場合，有効応力減少比は CASE < CASE < CASE CASE の順に大きくなっている．特に CASE ，CASE ，CASE では X・Y 各方向から入力するひずみの繰返し回数の総計は等しいが有効応力減少量には違いが生じている．同様の傾向は相対密度が異なっても見られる．

この原因については明確ではないが，せん断時の骨格の変形モードに起因していると考えられる．すなわち，CASE では供試体は一方向のみの繰返しせん断によって生じるダイレイタンスーによって有効応力減少が生じるが，CASE では繰返しせん断の 1/2 部分は，CASE のせん断方向と垂直な方向への変形が含まれる．さらに，CASE においては，CASE と CASE いずれとも異なった方向にせん断変形が生じる．そのためにダイレイタンスーにも影響が生じたものと考えられる．すでに 3 次元応力状態における単調載荷時のダイレイタンスー係数については提案されているが，ここで示した変形モードに対しては適用できないことから新たなダイレイタンスーの表現について検討する必要がある．

(2) 沈下に及ぼす繰返しせん断方向の影響

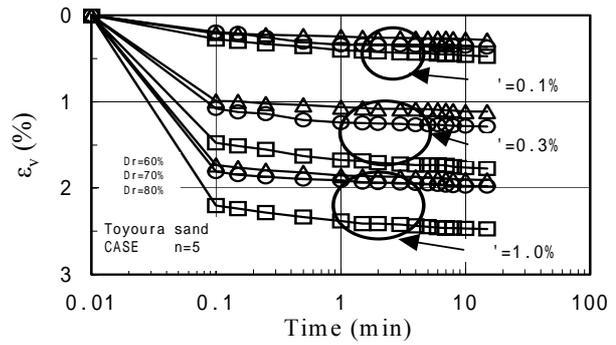
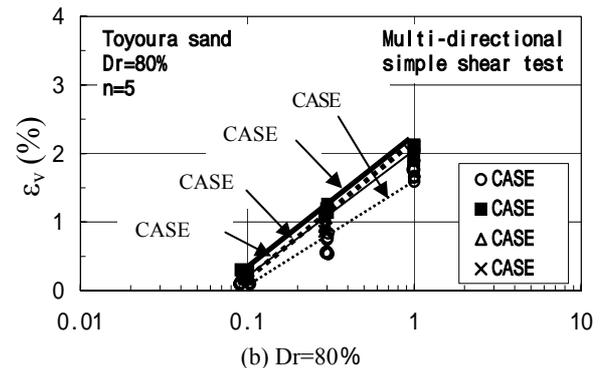
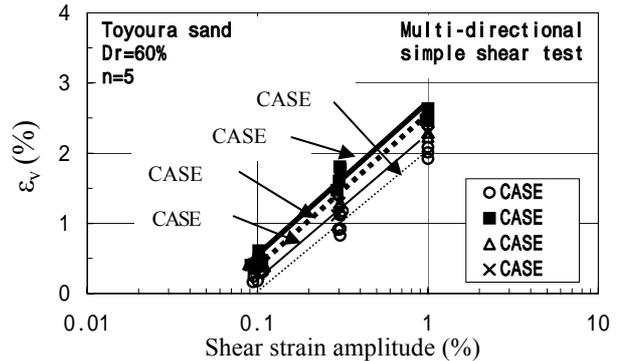


図-6 沈下ひずみの経時変化



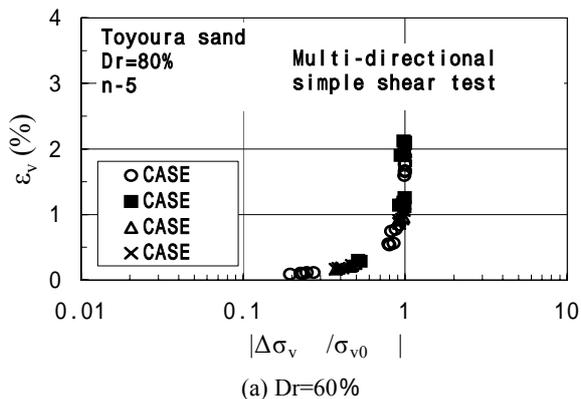
(b) Dr=80%

図-7  $\epsilon_v$ とせん断ひずみ振幅の関係

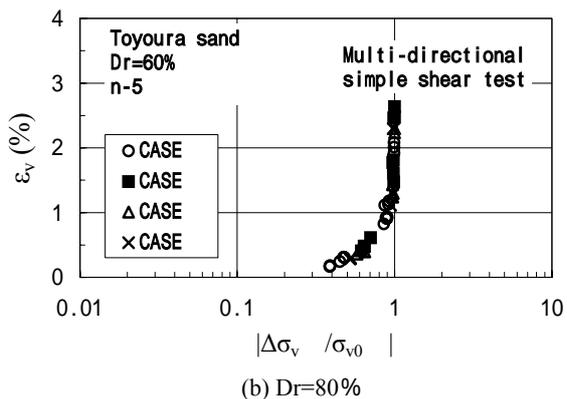
図-6 は繰返しせん断終了後に行った再圧密試験において得た沈下ひずみ  $\epsilon_v$  と経過時間の関係を示したものである．

同図より，せん断ひずみ振幅が大きいほど，また相対密度が小さいほど沈下ひずみは大きくなっている．圧密は再圧密後 6 秒以内にほぼ終了しているが，6 秒以降もほぼ直線的に沈下が進行する傾向が見られる．

図-6(a)(b)は，沈下ひずみ  $\epsilon_v$  とせん断ひずみ振幅の関係を示したもので，それぞれ相対密度 Dr = 60%および 80%の結果である．同図より，せん断ひずみ振幅が大きくなるほど沈下ひずみ  $\epsilon_v$  が大きくなる傾向がみられ，また，沈下量は CASE < CASE < CASE CASE の順に大きくなっている．この傾向は，図-5 で示した有効応力減少比  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v0}|$  とせん断ひずみ振幅の関係と一致しているが，繰返しせん断方向の相違が，結果的に沈下量にも影響を与えている．図-7 において，CASE と



(a) Dr=60%

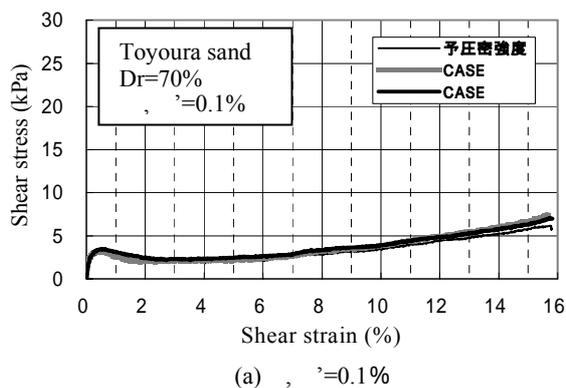


(b) Dr=80%

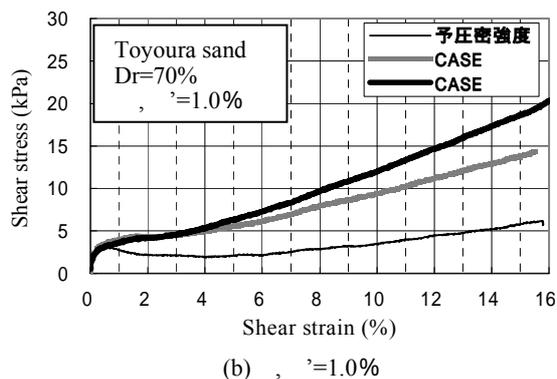
図-8  $\varepsilon_v$  と  $|\Delta\sigma'_v / \sigma'_{v0}|$  の関係

CASE の沈下量はほぼ等しくなっている．一方，Pyke 等<sup>3)</sup>は gyratory shear (x 方向と y 方向のせん断波の位相差が  $90^\circ$  となるケースで，CASE と一致)によって生じる沈下は，一方向载荷によって生じる沈下の 2 倍に等しいことを示した．しかし，ここでの結果は，CASE と CASE が等しくなっており，Pyke 等の結果とは異なっている．この原因については明確ではないが，Pyke 等の実験は応力制御によっているため，ひずみ振幅を基準に比較できないこと，拘束圧が小さい等の影響が考えられる．

図-8(a)，(b)は，再圧密によって生じた沈下ひずみ  $\varepsilon_v$  と繰返しせん断中に生じた有効応力減少比  $|\Delta\sigma'_v / \sigma'_{v0}|$  の関係で，それぞれ相対密度  $Dr=60\%$  および  $80\%$  の結果である．同図より，有効応力減少比の増加とともに沈下ひずみは急激に増大している．また，いずれの結果もせん断方向の違いによらずほぼ同一の曲線上にある．このことは，繰返しせん断中に生じる有効応力減少量が同じであれば，再圧密時の沈下量は等しいことを示しており，また载荷の方向性の影響はみられない．この結果は，Nagase 等<sup>2)</sup>による繰返しせん断後に生じる砂層の沈下に及ぼす载荷の方向性の影響は無いということと一致している．ただ，図-5(a)(b)からも明らかのように CASE ではせん断ひずみ振幅が  $0.3\%$  において有効応力減少比が  $1.0$  となっている．またせん断ひずみ振幅が  $1.0\%$  においては，いずれのケースにおいても有効応力減少比は  $1.0$  になっている．一方，図-7(a)(b)か



(a)  $\gamma=0.1\%$



(b)  $\gamma=1.0\%$

図-9 せん断応力とせん断ひずみの関係

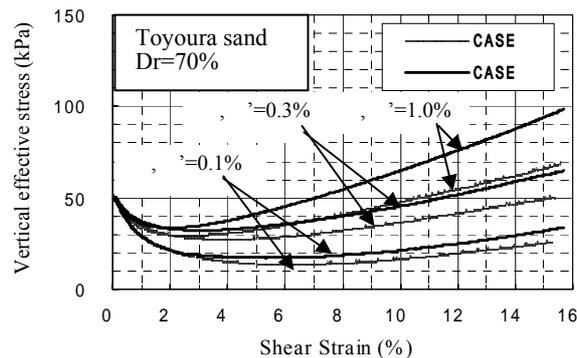


図-10 鉛直有効応力の経時変化 (再圧密後)

ら明らかのように，せん断ひずみ振幅が  $1.0\%$  において生じる沈下ひずみは明らかに载荷方向の影響を受けることがわかる．すでに，Nagase 等<sup>2)</sup>は，液状化後に生じる沈下ひずみは，液状化にいたるまでに生じたひずみの大きさに依存することを示しているが，ここでの結果はそれに加えて繰返しせん断の方向の影響も無視できないことを示している．

### (3) 繰返しせん断方向が砂層の強度特性に及ぼす影響

図-3 において，CASE と CASE について繰返しせん断を行った後再圧密した供試体に対して静的せん断試験を行った．図-9(a)(b)は，相対密度  $70\%$  についてせん断応力とせん断ひずみの関係を示したもので，それぞれ繰返しせん断時のひずみ振幅が， $0.1\%$  と  $1.0\%$  についての結果である．同図には繰返しせん断履歴を持たない供試体についての結果も示している．

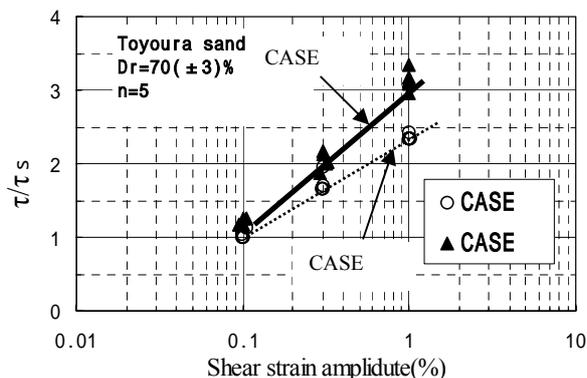


図-11  $\tau/\tau_s$  とせん断ひずみ振幅の関係

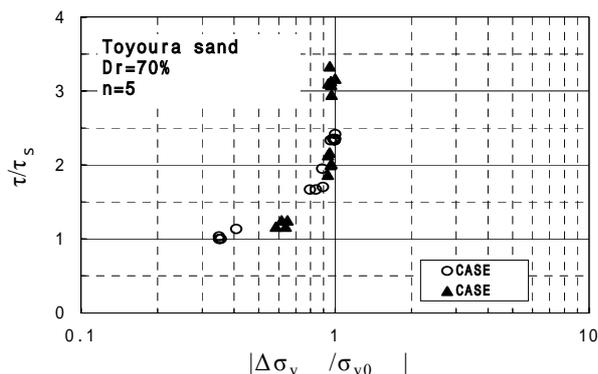


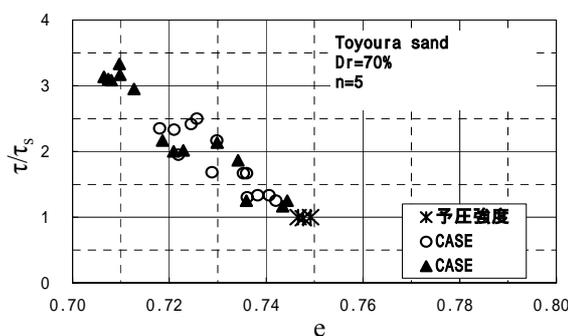
図-12  $\tau/\tau_s$  と  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{vo}|$  の関係

図-9(a)より、繰返しせん断時のひずみ振幅が0.1%では、繰返しせん断履歴がない場合の強度とほぼ等しくなっている。また、繰返しせん断の方向についてもその影響はほとんど見られない。一方、図-9(b)より、ひずみ振幅が1.0%の場合においては、明らかにせん断強度の増加がみられ、また、CASE と CASE を比較した場合、明らかにCASE の強度が大きいくことがわかる。

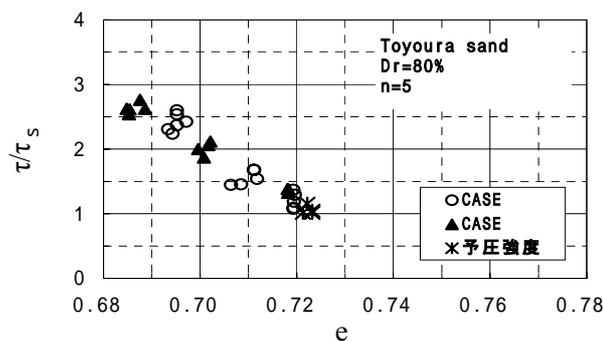
図-10 は静的せん断中の鉛直有効応力の変化を示したものである。繰返しせん断ひずみ振幅が小さい場合、鉛直有効応力は減少傾向にあるが、ひずみ振幅の増加とともに減少傾向から増加に転じ、特にCASE ではCASE に比べて増加量が大きくなっている。

図-11 は、強度比  $\tau/\tau_s$  と繰返しせん断時のひずみ振幅の関係である。ここに、 $\tau_s$  は繰返しせん断履歴を持たない場合の静的強度、 $\tau$  は再圧密後の強度である。なお、ここでは強度の定義としてせん断ひずみが15%のときのせん断応力を用いることにした。同図から、せん断ひずみ振幅の増加とともに強度比も大きくなり、CASE と CASE を比較すると、CASE の方が強度の増加が顕著であって、繰返しせん断方向は、静的強度にも影響することがわかる。

図-12 は、強度比  $\tau/\tau_s$  と有効応力減少比  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{vo}|$  の関係である。図-8(a)(b)で示した、沈下ひずみ  $\varepsilon_v$  と有効応力減少比  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{vo}|$  の関係と同様に、 $\tau/\tau_s$  と有効応力



(a) Dr=70%



(b) Dr=80%

図-13  $\tau/\tau_s$  と e の関係

減少比  $|\Delta\sigma'_v/\sigma'_{vo}|$  にも一義的な関係がみられる。

図-13(a)(b)は、強度比  $\tau/\tau_s$  と再圧密後の供試体の間隙比 e の関係で、それぞれ相対密度が70%と80%についての結果である。両図より、強度比  $\tau/\tau_s$  と間隙比 e の間には繰返しせん断の有無によらず、また繰返しせん断方向によらず一義的な関係が見られる。再圧密後の間隙比は繰返しせん断後の再圧密沈下量に依存すること、また再圧密沈下量は繰返しせん断中のひずみ振幅とせん断方向に依存することから、繰返しせん断に起因した強度増加の評価を行うことが可能である。

#### 4. 結論

繰返しせん断方向が飽和砂の沈下・強度特性に及ぼす影響を明確にするため、ここではCASE ~CASE の4載荷パターンについて繰返しせん断を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 繰返しせん断中の有効応力減少量には繰返しせん断方向の影響がみられる。
- (2) 繰返しせん断後の再圧密沈下の大きさは、繰返しせん断方向が影響する。一方、再圧密沈下の大きさは液状化が生じるまでは有効応力減少量とほぼ一義的な関係が見られる。ただし、液状化後の沈下は、せん断ひずみ振幅および繰返し載荷方向によって影響を受ける。
- (3) 再圧密後の静的せん断強度は、再圧密中に生じる間隙比減少量に依存する。

参考文献

- 1 ) 松田博, 山本智一, 櫻谷慶治: 繰返しせん断方向が粘土層・砂層の沈下特性に及ぼす影響, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, d, pp.605-608, 2001.8.
- 2 ) Nagase H. and Ishihara K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.65-76, 1988.
- 3 ) Pyke R., Seed H. B. and Chan C. K.: Settlement of sands under multi-directional shaking, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.101, No.GT4, pp.379-398, 1975.

(2003.6.30 受付)

EFFECTS OF DIRECTION OF CYCLIC SHEAR ON THE EFFECTIVE STRESS  
REDUCTION AND POST-EARTHQUAKE SETTLEMENT OF SATURATED SAND

Hiroshi MATSUDA, Naoki OKADA and Kouichi TAKAMIYA

The direction of acceleration in the ground which is caused by the earthquake is not uniform and also the direction of cyclic shear stress which is subjected to the soil elements varies multi-directionally. By using the multi-directional cyclic simple shear test apparatus which can apply the shear deformations to the specimen from the orthogonal direction independently, the effects of direction of shear strain on the reduction of effective vertical stress, reconsolidation settlement and the shear strength of saturated sand were observed. In conclusion, it was found that the effective stress reduction is affected by the direction of cyclic shear and that the reconsolidation settlement of sand depends on the decrease in the effective stress during cyclic shear. The static shear strength of sand also depends on the effective stress reduction.