

多方向繰返しせん断を受けた飽和砂の強度・沈下特性

山口大学 正会員 松田博

山口大学大学院 学生会員 山本智一

山口大学大学院 学生会員 岡田尚樹

1. はじめに 地震により攪乱を受けた地盤は、一時的にせん断強度が減少するものの、その後圧密されることによりせん断強度は回復し、最終的には原地盤の強度を超えることが知られている¹⁾。これらの研究の成果は、粘性土を対象とするもので、砂地盤の強度に及ぼす地震動の方向性の影響については考慮・検討されていない。そこで、本研究では多軸単純せん断試験機を用い、豊浦砂に対して一方向繰返しせん断、Gyratory shear を与え、再圧密後の強度・沈下特性について検討した。

2. 実験方法 用いた装置は多軸単純せん断試験機である。この装置は水平直角 2 方向から独立して同時に繰返し単純せん断を行うことが可能である。実験で用いた試料は豊浦砂である。試料の物理定数は $\rho_s = 2.631(\text{g/cm}^3)$ 、 $e_{\max} = 0.971$ 、 $e_{\min} = 0.658$ である。実験は、相対密度を約 60%、70%、80% に調整した飽和試料をせん断箱に詰めた後、圧密圧力 49kPa で予圧密した。その後、定体積条件の下で繰返しせん断試験を行った。繰返しせん断後は圧密圧力 49kPa で再圧密を行い沈下量を測定した。また、繰返しせん断による攪乱が強度に及ぼす影響を明確にするために予圧密後、及び再圧密後にそれぞれせん断ひずみ速度 1%/min として静的せん断試験を行った。繰返しせん断の波形はサイン波であり、図-1 に示す 4 ケースの載荷方法によって実験を行った。

CASE I ; X 方向から所定の回数(n)のせん断ひずみを負荷。

CASE II ; X, Y 両方向から位相差($\theta = 90^\circ$)として所定の回数のせん断ひずみを負荷。($\theta = 90^\circ$ の時を特に Gyratory shear と呼ぶ。)

CASE III ; X 方向から所定の回数(n)の繰返しせん断ひずみの負荷後、Y 方向から同回数の繰返しせん断ひずみを負荷。

CASE IV ; X 方向から回数(2n)の繰返しせん断ひずみを負荷。

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 γ 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、一方向繰返しせん断では、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 γ とし、多方向繰返しせん断では、供試体下端面（上端面は固定）中心の軌跡を測定し、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 γ' とした。

3. 試験結果 図-2 は繰返しせん断中に得られる有効応力減少比 $|\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'|$ と繰返し回数 n の関係について、CASE III と CASE IV を比較したものである。ここに $\Delta\sigma_v'$ は有効応力減少量、 σ_{v0}' は圧密圧力である。CASE III は X

方向について繰返し回数 5 回の繰返しせん断後、Y 方向に同回数の繰返しせん断を行い、CASE IV では X 方向のみに 10 回の繰返しせん断を行った。CASE III と CASE IV を比較すると、CASE III のように途中でせん断方向を変えることにより $|\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'|$ が増加することがわかる。すなわち、砂層の有効応力減少量にはせん断方向が影響することがわかる。

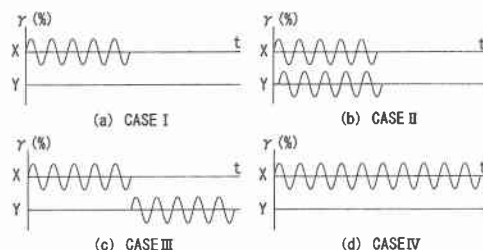


図-1 繰返しせん断方法

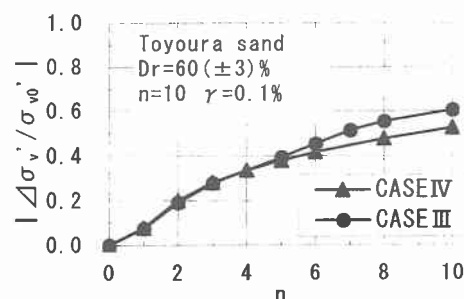
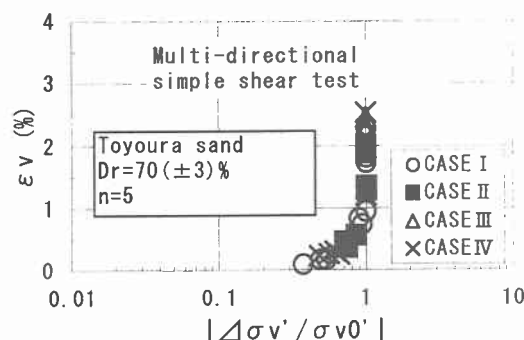
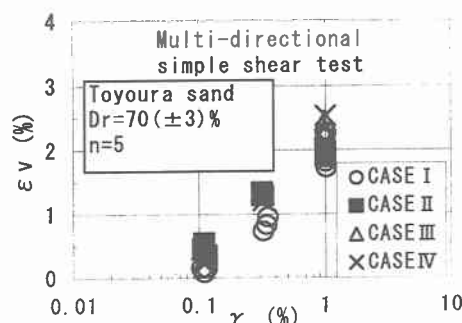
図-2 $|\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'|$ と n の関係図-3 ε_v と $|\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'|$ の関係図-4 ε_v と γ の関係

図-3 は再圧密中の最終沈下ひずみ ε_v と繰返しせん断中に生じる有効応力減少比 $|\Delta\sigma_v'/\sigma_v'|$ の関係である。同図より、プロットはほぼ同一の曲線上に載っていることがわかる。また、このことは異なる相対密度においても同様にみられた。このことより、有効応力減少量が同じであれば、せん断方向にかかわらず生じる沈下量は同じであるといえる。ただ、このことは繰返しせん断中に有効応力が0にならない場合に限っていえることである。図-4 は沈下ひずみと γ との関係である。同図から、沈下量に及ぼすせん断方向の相違の影響が確認できる。また、このことは異なる相対密度についても同様にみられ、 γ が大きくなるほど沈下ひずみが大きくなる傾向がみられる。

繰返しせん断方向がせん断速度に及ぼす影響を調べるために、繰返しせん断履歴のない状態での強度を測定した。図-5 は、予圧密後に静的せん断試験を行って得た、せん断応力とせん断ひずみの関係である。静的強度は、せん断応力-ひずみ関係に明確なピークが現れなかったため、15 % せん断ひずみ時のせん断応力を初期強度 τ_s とした。初期強度は、 $Dr=70\%$ の場合 $\tau_s=6.0\text{kPa}$ 、 $Dr=80\%$ の場合 $\tau_s=13.0\text{kPa}$ である。

図-6 は繰返しせん断後再圧密を行った供試体に対して静的せん断試験を行って得たせん断応力と静的せん断ひずみの関係である。同図には、初期強度 τ_s を直線で示した。同図より、繰返しせん断-再圧密後の強度は、初期強度より大きくなっている。また、与えるひずみ振幅 γ が大きいほど強度増加量は大きくなっており、このことは異なる相対密度についても同様にみられる。また、CASE I と CASE II を比較した場合には、CASE II の方が強度の増加量は大きくなっている。これらの結果から、飽和砂の強度変化量はひずみ振幅 γ の大きさに依存していること、繰返しせん断中に生じる有効応力減少が大きく影響しているといえる。

図-7 は、再圧密後のせん断強度 τ を、初期強度 τ_s で正規化した排水強度比 τ/τ_s と有効応力減少比 $|\Delta\sigma_v'/\sigma_v'|$ の関係である。同図から明らかなように、 τ/τ_s と $|\Delta\sigma_v'/\sigma_v'|$ には一義的な関係がみられる。すなわち、強度変化は有効応力の変化に依存していると言える。また、相対密度が大きいほど強度は大きくなっており、同一の相対密度では、繰返しせん断方向の影響はみられない。以上のことから、強度の変化量は、せん断方向に関係なく、繰返しせん断中の有効応力減少量によって決まるといえる。

強度比 τ/τ_s と静的せん断試験前の供試体の間隙比 e との関係を示したものが図-8 である。同図から、強度比 τ/τ_s と静的せん断試験前の間隙比 e には直線的な関係にあり、間隙比が小さいほど強度が大きくなるといえる。また、この傾向は異なる相対密度においても同様にみられる。

4. 結論 繰返しせん断方向が飽和砂の沈下・強度特性に与える影響を確認するため4種類の載荷パターンでの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見られる。
- (2) 繰返しせん断後の沈下は、繰返し回数が少ない段階、すなわち液状化前、もしくは初期液状化状態においてはせん断中の有効応力減少量と一義的な関係にある。
- (3) 静的せん断強度は、繰返しせん断中の有効応力減少量、再圧密中の間隙比変化量に依存する。
- (4) $\tau/\tau_s \sim |\Delta\sigma_v'/\sigma_v'|$ の関係、および $\tau/\tau_s \sim e$ の関係は、繰返しせん断方向によって影響されない。

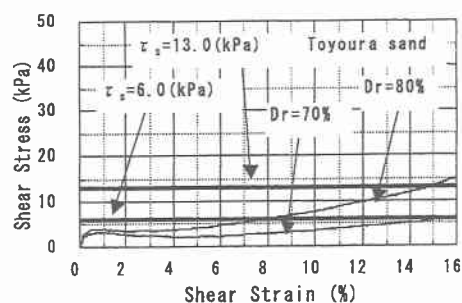


図-5 τ と γ の関係 (予圧密後)

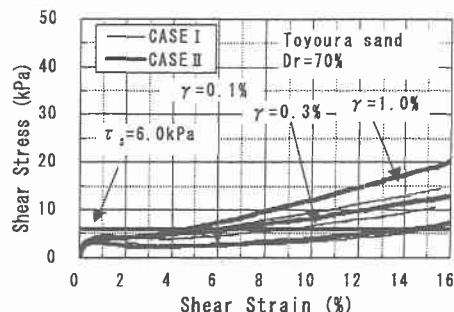


図-6 τ と γ の関係 (再圧密後)

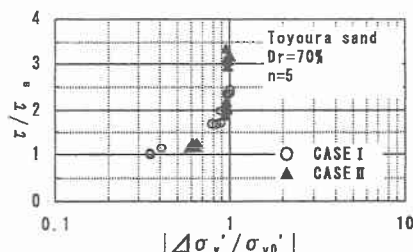


図-7 τ/τ_s と $|\Delta\sigma_v'/\sigma_v'|$ の関係

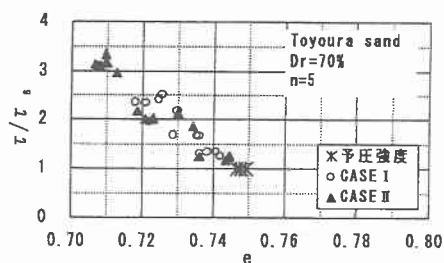


図-8 τ/τ_s と e の関係