

繰返しせん断の主応力方向を制御した液状化試験手法の開発

長岡技術科学大学大学院 ○湯守 泰良
長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田 浩史

1. はじめに

東日本大震災（2011年）や能登半島地震（2024年）など、我が国で発生した大規模地震において、液状化現象は広範囲で発生し、多大な被害をもたらした。これらの地震後に注目されたのが「再液状化」の問題である。再液状化とは、一度液状化を経験した地盤が再度地震動を受けることで再び液状化現象を引き起こす現象のことである。

この現象は、耐震設計や復興計画における重要な課題として位置付けられている。しかしながら、再液状化のメカニズムについては未だ解明されていない点が多く残されている。これには、土粒子の再配列や密度変化、応力履歴の影響など、多岐にわたる要因が含まれる。本研究はこの中の粒子配向性の影響を、せん断時の主応力方向を変化させることで調べ、液状化や再液状化のメカニズムを解明することを目的としている。

2. 既往研究

従来の液状化試験では、砂粒子に特定の配向性を持たせた供試体を作製する方法が一般的に採用されている。例えば、漏斗を使用して砂を堆積させる場合、粒子は通常 0° の角度で堆積する。そのため、粒子の配向性（異方性）を意図的に変化させるには、供試体を作る際に容器の角度を調整する必要があった。液状化挙動の評価には、これまで三軸試験（図1）と振動台試験（図2）が広く用いられてきた。

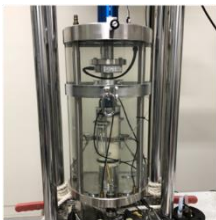


図1：三軸試験

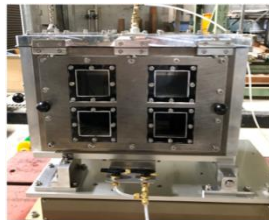


図2：振動台試験

三軸試験では、軸方向に繰返しせん断力を加えることで液状化特性を評価する。この手法では、

図3のように 90° 配向の供試体が 0° 配向の供試体よりも高い液状化強度を示すことが確認されている¹⁾²⁾。

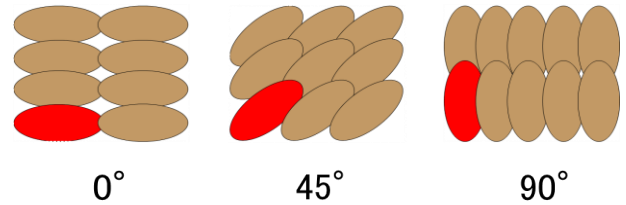


図3：粒子配向性

一方、振動台試験では水平方向に振動を加えることにより液状化挙動を調べるが、この場合は 0° 配向の供試体が 90° 配向の供試体よりも高い液状化強度を示すという、三軸試験とは異なる結果が得られている。これらの試験結果は、粒子の配向性や応力方向が液状化特性に与える影響の重要性を示している。異方性を正確に評価するためには、粒子配向性と応力方向の関係を考慮した繰返しせん断試験が必要である。本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、同一の供試体に対して異なる応力方向を与えた液状化試験を開発することを目的とした。この試験装置の適用性と試験結果への影響についても検討を行った。

3. 試験内容

3.1. 中空ねじり試験装置について

この試験装置は中空円筒供試体に回転力を加えて円周方向にねじることで、供試体全体にせん断変形を与える。回転力の他に軸力、外圧、内圧を制御することで、3主応力を制御することが可能である。これらより、原地盤での応力・変形条件を忠実に再現することが可能である。また、平均的な応力を計算することにより、主応力の大きさおよび方向 a 、中間主応力係数 b を制御することが可能である。

3.2. 試験試料

本研究では豊浦砂を砂試料として用いた。この

試料は乾燥後、475 μm ふるいを通した試料のみを使用した。豊浦砂は土粒子密度が2.65(g/cm³)であり、ほぼ中砂にて構成された純粋な砂であることが図4の粒径加積曲線および表1の豊浦砂の物性値によりわかる。

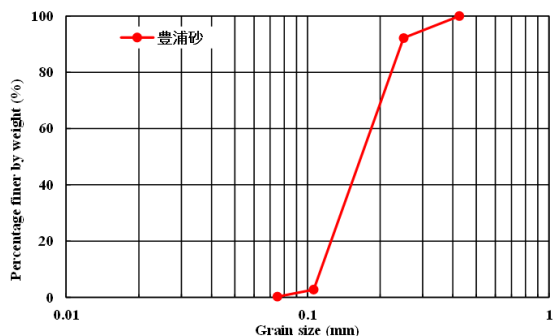


図4：豊浦砂の粒径加積曲線

表1：豊浦砂の物性値

密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.65
最大間隙比 e_{max}	0.99
最小間隙比 e_{min}	0.597
均等係数 U_c	1.55
曲率係数 U_c'	1.05
細粒分含有率 F_c	0

3.3. 試験方法

本研究は飽和条件でせん断試験を行った。作製した供試体を試験機にセットした後、供試体を飽和させるために二重負圧および通水を行った。二重負圧とは供試体内部から空気を取り除くことを目的として供試体内部に真空を供給する方法である。空気を吸い出した状態で通水することで、水が通りやすくなり飽和度を高めることが出来る。通水終了後、供試体を安定させるためにセル圧を50kPaにして等方予備圧密を行った。この等方予備圧密は供試体上下から排水させ、排水量が落ち着くまで行った。その後、二重セルを組み立て、二重セル内にも給水した。この二重セル内の水位を用いて供試体の体積変化を計測する。その後、背圧を作用させ圧密を行った後、非排水条件でせん断試験を行った。

3.4. 制御方法

本試験の中空ねじり試験装置には4つの自由度があるため4つの条件を与えることができる。設定した条件が満たされているかの結果を、図5～9に示す。

① 非排水で、一定ひずみ速度で $\sigma_{z\theta}$ (or σ_z) の 載荷

一定の速さでねじり変形させることで一定ひずみ速度での載荷を行うことができる。

図5より、排水量が一定、図6より一定ひずみ速度で載荷できていることが確認できた。

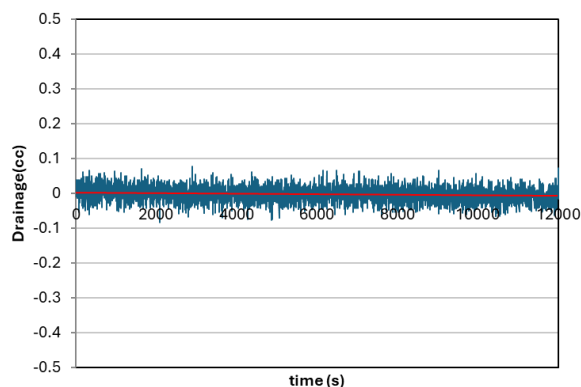


図5：時間 - 排水量

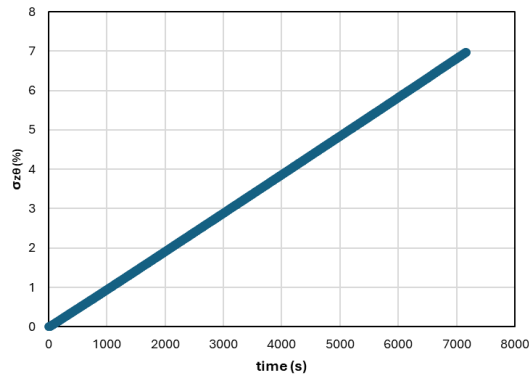


図6：時間 - ひずみ

② 主応力方向 $\alpha = \text{一定}$

最大主応力 σ_1 の方向を、任意の角度(α)で、一定になるように制御する。

図7より、主応力方向 α が一定で制御できていることが確認できた。

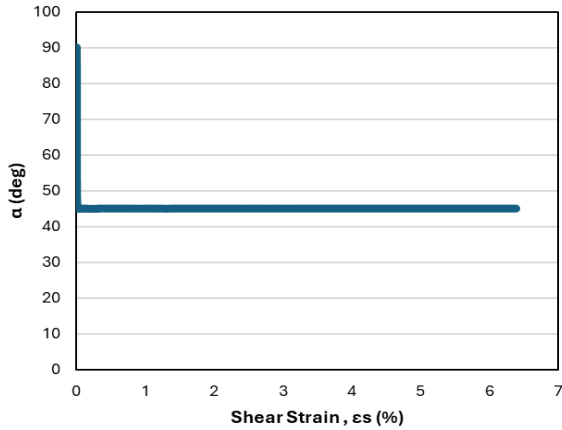


図 7 : ひずみ - 主応力方向

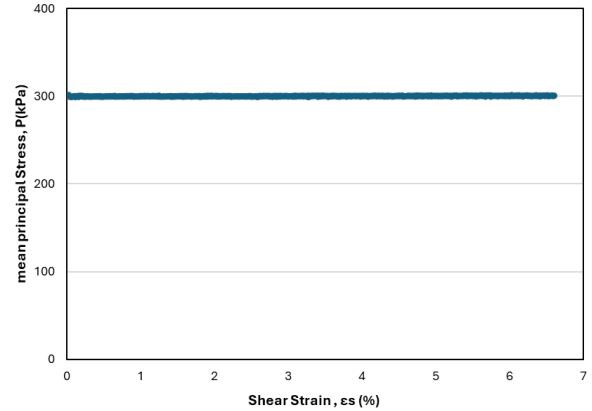


図 9 : ひずみ - 平均全応力

③ 中間主応力係数 $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \text{一定}$

中間主応力係数とは 3 主応力 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) のうち σ_2 が σ_1, σ_3 の値どちらに近いかを表す係数となっており, σ_1 に近いと値が 1 となり供試体が伸張する. σ_3 近づくと 0 になっていき, 供試体は圧縮する. 図 8 より, 中間主応力係数 b が一定で制御できていることが確認できた.

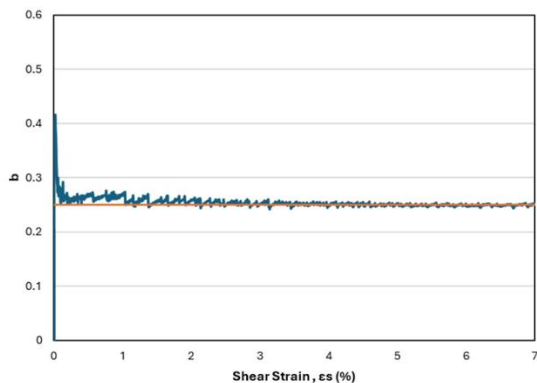


図 8 : ひずみ - 中間主応力係数

④ 平均全応力 $p = (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)/3 = \text{一定}$

平均全応力とは 3 つの垂直応力 ($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$) を平均した値である. 試験中, それぞれ 3 つの垂直応力は変化するが平均全応力が一定になるように制御を行う. 図 9 より, 平均全応力 p が一定で制御できていることが確認できた.

3.5. 中間主応力係数 b の決定

本研究では, 繰返しせん断時の主応力方向を制御するにあたり, 中間主応力係数 b を一定に設定する必要があり, 半無限に広がる水平地盤を想定している. このような地盤が地震動を受ける場合, 変形は主として水平方向のせん断変形として生じると考えられる. また, 地盤は水平方向に広く連続しているため, 水平方向のひずみは拘束されるとみなすことができ, 応力・ひずみ状態は非排水水平面ひずみ条件に近似される. したがって, 実地盤の地震時挙動を合理的に再現するため, 本研究では単純せん断状態を採用した.

単純せん断条件における試験結果を整理したところ, 図 10 より中間主応力係数 b は概ね 0.25 に収束することが確認された. そこで, 本研究で $b=0.25$ を基準値として設定し, 主応力方向を変化させた単調載荷試験を実施した.

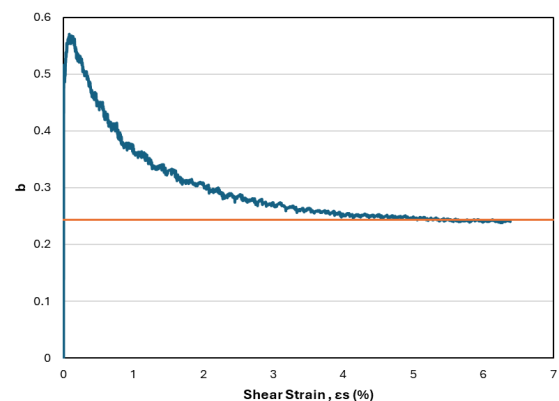


図 10 : 単純せん断状態 試験結果

4. 試験結果

4.1. 主応力方向 α を変化させた試験結果

本試験は、制御条件および応力状態の整合性を確認したうえで、主応力方向を変化させた場合の力学挙動を比較することを目的として、平均主応力一定 ($p = \text{const.}$), 中間主応力係数 $b=0.25$ の下で、単調載荷試験を実施した。主応力方向 α を 0° から 75° まで段階的に変化させ、各条件における平均有効応力 - 偏差応力, せん断ひずみ - 偏差応力挙動を図 11, 図 12 に示す。

図 11 より, まず初期挙動に着目すると, 変相点付近において, 主応力方向 α が大きいほど平均有効応力 p' の低下が顕著となる傾向が確認された。

次に破壊線の挙動に着目すると, 主応力方向 α が大きいほど破壊線の傾きは小さくなり, 同一の平均有効応力 p' に対する偏差応力 q の増加は緩やかとなった。すなわち, 主応力方向 α が水平方向に近づくほど, せん断抵抗の発達が抑制される傾向が認められた。

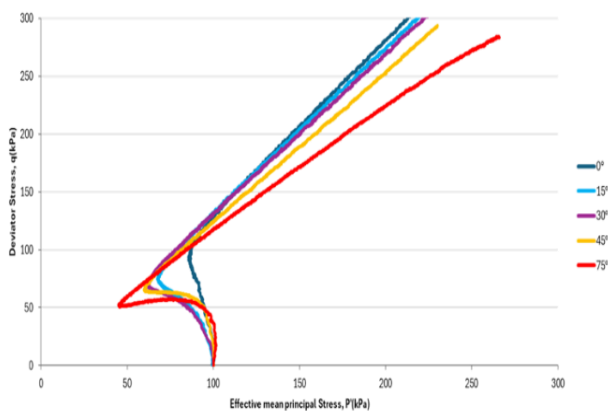


図 11 : 主応力方向 α を変化させた平均有効応力 p' - 偏差応力 q

図 12 より, 主応力方向 α が小さいほど偏差応力 q の増加が大きく, 高い剛性および強度を示すことが確認された。一方, 主応力方向 α が大きくなるにつれて偏差応力 q の発達は抑制され, 強度が低下する傾向が認められた。したがって, 主応力方向 α はせん断特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

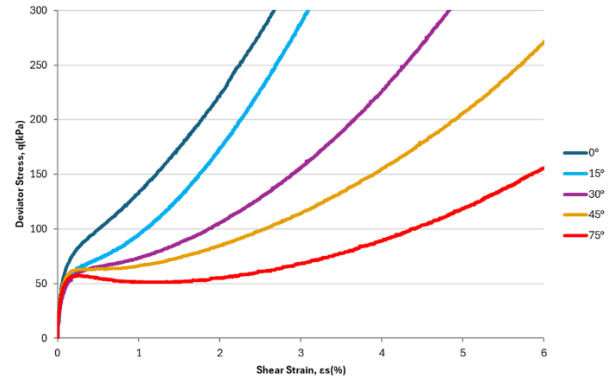


図 12 : 主応力方向 α を変化させたせん断ひずみ ϵ_s - 偏差応力 q

4.2. 中間主応力係数 b を変化させた試験結果

次に, 中間主応力係数 b の影響を検討した。平均主応力一定 ($p = \text{const.}$), 主応力方向 $\alpha = 45^\circ$ の下で単調載荷試験を実施した。中間主応力係数 b を 0 から 0.75 まで段階的に変化させ、各条件における平均有効応力 - 偏差応力, せん断ひずみ - 偏差応力挙動を図 13, 図 14 に示す。

図 13 より, 中間主応力係数 b が小さいほど偏差応力 q の増加が大きく, 高い剛性および強度を示すことが確認された。一方, 中間主応力係数 b が大きくなるにつれて偏差応力 q の発達は抑制され, 強度が低下する傾向が認められた。

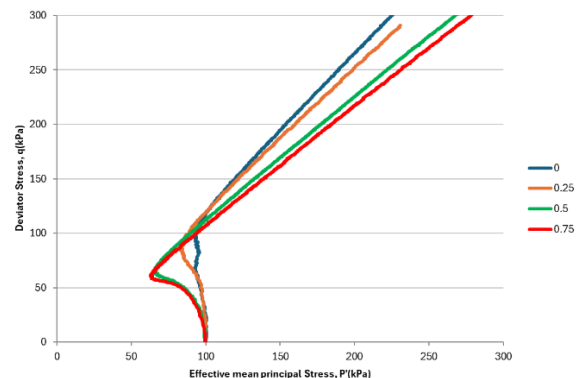


図 13 : 中間主応力係数 b を変化させた平均有効応力 p' - 偏差応力 q

図 14 に示すせん断ひずみ - 偏差応力関係においても, 中間主応力係数 b の違いによる影響が確認された。中間主応力係数 b が小さいほど偏差応

力 q の増加は大きく、高い剛性および強度を示した。一方、中間主応力係数 b が大きくなるにつれて偏差応力 q の発達は緩やかとなり、強度の低下が認められた。

図 13, 図 14 の傾向は、先に示した主応力方向 α の影響と概ね同様であり、中間主応力係数 b もせん断特性に対して重要な支配因子であることが確認できた。

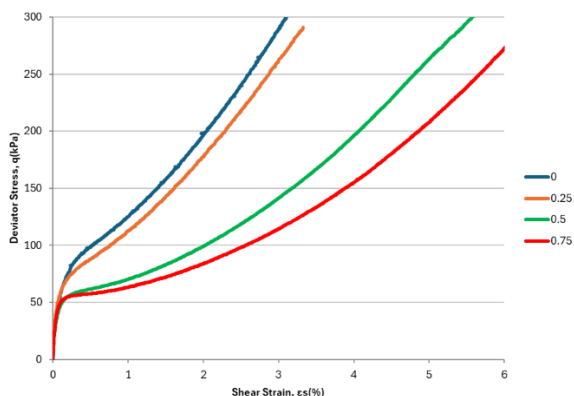


図 14 : 中間主応力係数 b を変化させたせん断ひずみ ϵ_s - 偏差応力 q

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ・非排水条件下で、主応力方向 α 一定、中間主応力係数 b 一定、平均全応力 p 一定の制御が適切に行われていることを確認した。
- ・主応力方向 α , 中間主応力係数 b の違いにより、有効応力経路およびせん断挙動に次のような差異が生じた。最大主応力方向 α または中間主応力係数 b が大きいと、間隙水圧の発生が大きく、破壊線の傾きは小さくなった。

6. 参考文献

- 1) 岩崎真也: 砂粒子配向性に着目した三軸試験と振動台試験による液状化強度の比較, 長岡技術科学大学修士論文, 2024.
- 2) 藤原涼: 三軸試験を用いた液状化による砂粒子配向性の変化, 長岡技術科学大学修士論文, 2022.