

主応力方向を制御した繰返し非排水せん断試験法の開発

長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院

○若林 優
湯守 泰良
正会員 豊田 浩史
高田 晋

1. はじめに

東日本大震災（2011 年）や能登半島地震（2007 年）では、液状化が広範囲で発生し大きな被害をもたらした。その後注目されたのが、一度液状化した地盤が再び地震動で液状化する「再液状化」である。再液状化は耐震設計や復興計画上の重要課題であるが、そのメカニズムには未解明な点が多い。本研究では、粒子配向性と繰返し载荷時の主応力方向に着目し、再液状化のメカニズム解明を目的とする。

2. 既往研究

従来の液状化試験では、砂粒子に配向性を持たせた供試体を作製するのが一般的であった。例えば、漏斗を用いた空中落下法で砂を堆積させると粒子長軸方向は 0° （水平）の角度に集中する。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る。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。

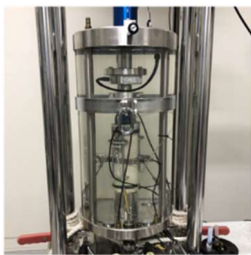


図-1：三軸試験

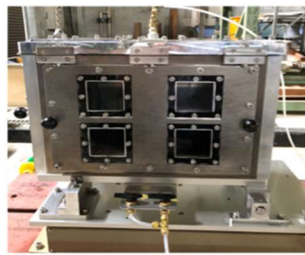


図-2：振動台試験

三軸試験では、軸方向に繰返し応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⁾。

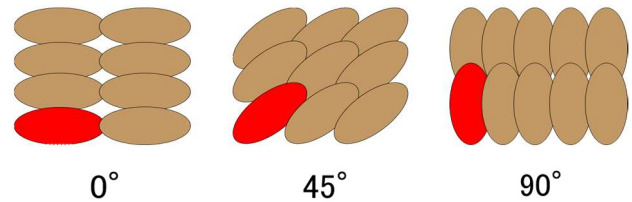


図-3：粒子配向性

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²⁾。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、粒子配向性と主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主応力方向で非排水繰返しせん断試験を実施した。この試験手法の開発と試験結果への影響について検討を行った。

3. 試験内容

3.1. 中空試験装置について

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、供試体全体をせん断変形させる。さらに、回転力の他に軸力、外圧、内圧を変化させることにより 3 主応力とその方向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。

3.2. 制御方法

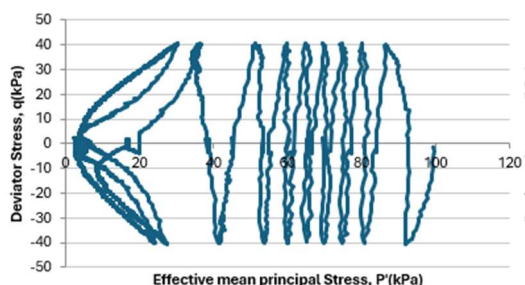
中空ねじり試験装置では、4 つの応力を制御できるため 4 つの条件を与えることができる。そこで以下の条件で制御を行うこととした。

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

- ② 主応力方向 $\alpha = \text{一定}$
- ③ 中間主応力係数 $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \text{一定}$
- ④ 平均全応力 $p = (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)/3 = \text{一定}$

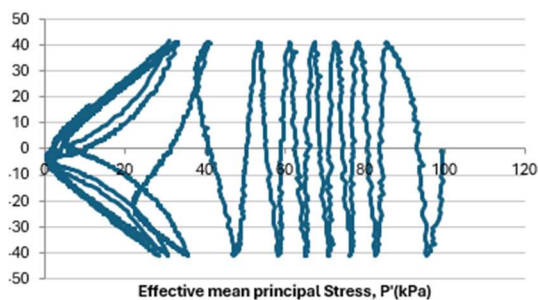
4. 試験結果

図-4 および図-5 は、主応力方向 $\alpha = -30^\circ$ (反転時 $\alpha = 60^\circ$) および -60° (反転時 $\alpha = 30^\circ$) における有効平均主応力 P' と偏差応力 q の関係を示す。試験はいずれも非排水条件下で、平均全応力 $p = \text{一定}$ 、中間主応力係数 $b = 0.5$ 、偏差応力 $q = 40 \text{ kPa}$ 、回転速度 $T = 0.2^\circ/\text{min}$ のもとで実施した。結果として、両条件の応力経路やグラフ形状はよく一致し、載荷・除荷時の挙動も類似していた。したがって、供試体は鉛直軸対称に作製できていることがわかる。さらに、この結果は $\alpha = 30^\circ$ (反転時 $\alpha = -60^\circ$) および -60° (反転時 $\alpha = 30^\circ$) の試験とも一致し、応力経路の対称性が実験的に裏付けられた。以上より、粒子配向角 0° 、 $b = 0.5$ 、 $p = \text{一定}$ の条件では、主応力方向が対称な場合に同様の応答が得られることが明らかとなった。



$\alpha = -30$

図-4 $\alpha = -30^\circ$, $b = 0.5$, $q = 40 \text{ kPa}$, $T = 0.2^\circ/\text{min}$



$\alpha = -60$

図-5 $\alpha = -60^\circ$, $b = 0.5$, $q = 40 \text{ kPa}$, $T = 0.2^\circ/\text{min}$

図-6 は、単純せん断状態でせん断ひずみを単調に与えた際の応力経路である。試験は平均有効応力一定の条件で実施し、偏差応力 q が約 500 kPa に達するまで載荷した。主応力方向 α および中間主応力係数 b の変化は、紙面の都合で示していないが、 α はせん断初期より 45° で安定した。また、急激に増化した b は、載荷に伴い減少し、最終的に 0.25 に収束した。したがって、原位置に近い状態（単純せん断状態）を考慮する時には、 b 値は 0.25 を使用することとした。

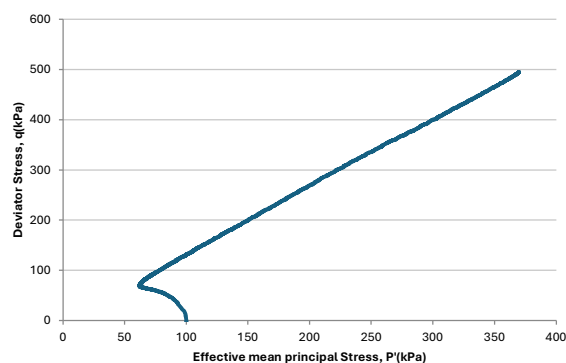


図-6 単純せん断 ($\alpha = 45^\circ$, $q = 500 \text{ kPa}$) 時の応力経路

5. 結論

主応力方向を制御した単調および繰返し非排水せん断試験法を開発した。結果から、粒子配向角 0° 供試体の鉛直軸対称性が示された。また、単純せん断状態において、 b は 0.25 に収束することがわかった。

6. 参考文献

- 1) 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，令和 4 年度長岡技術科学大学修士論文，2022。
- 2) 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，令和 6 年度長岡技術科学大学修士論文，2024。