

中空ねじりせん断試験による主応力方向を考慮した液状化試験

長岡技術科学大学大学院 ○若林 優
長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田 浩史
長岡技術科学大学大学院 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。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もある。本研究では、粒子配向性と繰返し載荷時の主応力方向に着目し、液状化の異方性に関する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。

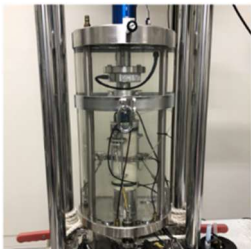


図-1 : 三軸試験

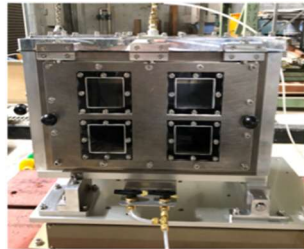


図-2 : 振動台試験

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⁾。

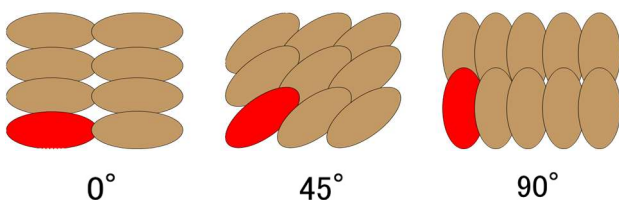


図-3 : 粒子配向性

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。その上で、この試験手法の開発と試験結果の確認を行った。

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、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) の載荷
- 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 $p = (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)/3 = \text{一定}$

具体的な試験条件として、偏差応力を $q = 40\text{kPa}$ で繰返し加え、中間主応力係数は $b = 0.25$ とした。主応力方向 α は $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ の5条件を設定し、それぞれの α に対応する軸ひずみ速度 V とねじり角速度 T を定めて載荷を行った。

4. 試験結果

各主応力方向 α ($15^\circ \sim 75^\circ$) で非排水繰返しせん断試験を行ったところ、すべてのケースで意図した通りの载荷を行うことができた。

一例として $\alpha = 45^\circ$, $b = 0.25$ の結果を示す。図-4 より、繰返し载荷が進むにつれて間隙水圧が高まり、有効平均主応力 p' が初期状態 (約 100 kPa) から 0 kPa に向かって徐々に低下していく様子が確認できた。また、偏差応力 q についても設定した ± 40 kPa の振幅で安定して载荷できている。

図-5 からは、有効応力が低下し、サイクリックモビリティに至ると供試体の硬さ (剛性) が落ち、最終的に大きなせん断ひずみが発生して液状化に至る過程が確認できる。また、せん断ひずみはプラス側とマイナス側の両方向に拡大・進展しているが、マイナス側の方が若干大きく進展する傾向が見られる。

図-6、図-7 より、ねじり方向が反転するときに、主応力方向 α は 45° から -45° , 中間主応力係数 b は、0.25 から 0.75 に変化することが確認された。 b 値に関しては、0.25 への収束に時間がかかっているようである。反転時に、 b が 0.75 と変化するが、こ

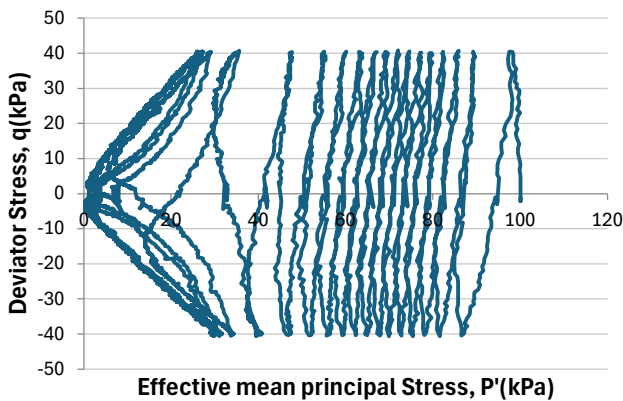


図-4 : $\alpha=45^\circ$ の偏差応力-平均有効主応力

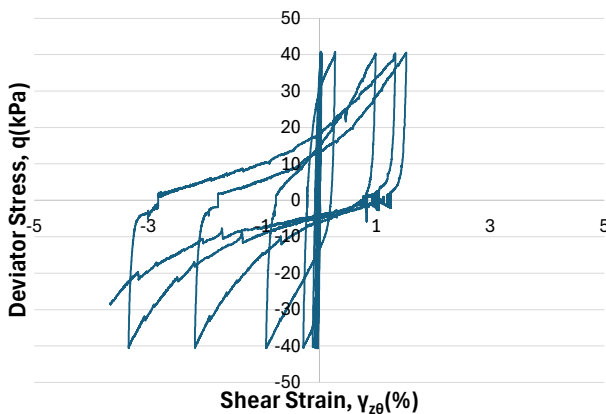


図-5 : $\alpha=45^\circ$ の偏差応力-せん断ひずみ

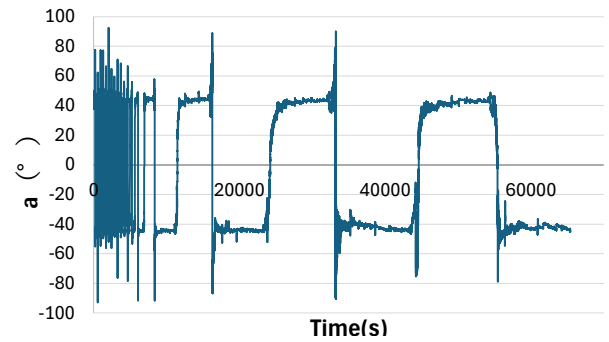


図-6 : 主応力方向 α の時間変化

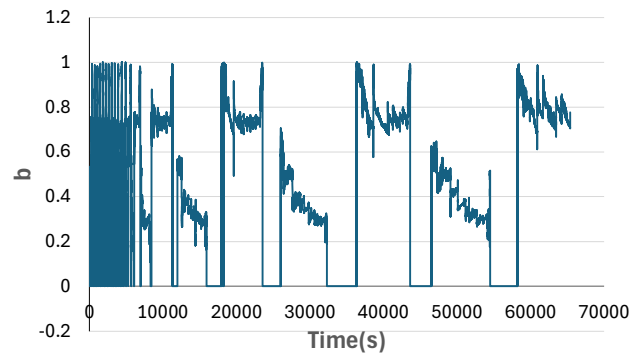


図-7 : 中間主応力係数 b の時間変化

の大きな b 値が影響して、図-5 では、マイナス側に大きくひずみが進展したものと考えられる。今後はこの理由について精査して、制御方法の改善にも取り組みたい。

5. 結論

本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、主応力方向 α を一定に保った繰返しせん断試験を行い、改善点は見られるものの、制御方法の妥当性を確認した。 $\alpha=15^\circ \sim 75^\circ$ の各条件において、繰返し载荷に伴う間隙水圧の上昇と液状化に至る過程を再現することができた。また、载荷方向の反転に伴って中間主応力係数 b が変化する挙動が確認され、主応力方向 α と中間主応力状態の関係を確認することができた。以上より、主応力方向 α を制御した液状化試験を問題なく実施できることを確認した。

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.