

主応力方向を考慮した液状化試験手法の開発

長岡技術科学大学大学院 〇松本 凌太郎
 長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田 浩史

1. はじめに

従来の液状化試験方法では従来の液状化試験方法では供試体に粒子配向性を持たせて供試体を作製する必要があった。漏斗で供試体を作製する場合、粒子は 0° の角度をもって堆積するため、任意の粒子配向性を得るためには、容器の角度を変えることで粒子配向性（異方性）のある砂試料を作製していた。

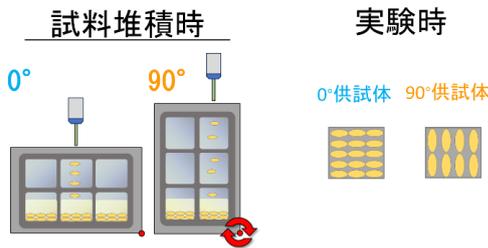


図-1 従来の砂の供試体作製

本研究では、液状化試験を三軸試験と振動台試験で実施してきている。三軸試験は軸方向に繰返しせん断するもので試験結果として図2のような液状化強度曲線が得られた。 90° 供試体の液状化強度曲線が 0° 供試体の液状化強度曲線より上にあり、液状化強度が強いことがわかる¹⁾。

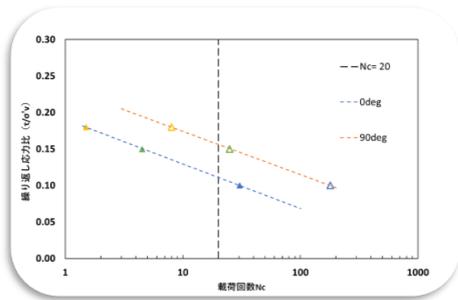


図-2 三軸試験での液状化強度曲線

振動台試験は水平方向に振動、つまり水平方向にせん断力が発生する試験機で図3のような液状化強度曲線を描いた。 0° 供試体の液状化強度曲線が 90° 供試体の液状化強度曲線より上にあり、液状化強度が強いことがわかる。これは三軸試験と結果が逆転している¹⁾。

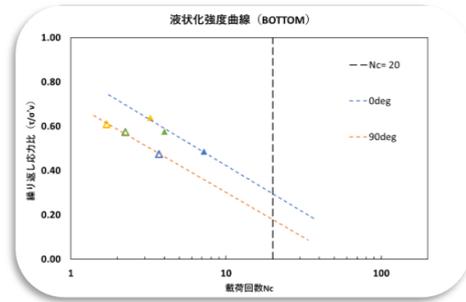


図-3 振動台での液状化強度曲線

これらの結果を踏まえ、異方性の影響を正確に評価するためには粒子配向性と主応力方向を考えた繰返し載荷が必要だと考えた。本研究では同じ供試体で主応力方向変えて実験を行うため、中空ねじりせん断試験装置で液状化試験の開発を行った。

2. 試験内容

2.1 中空試験装置について

中空ねじりせん断試験装置は三軸試験装置と比較して、直接せん断応力を作用させることができることが特徴である。軸力、ねじり力、外圧、内圧の4つの外力を供試体に作用させることができ、3つの垂直応力 ($\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$) とせん断応力 ($\sigma_{z\theta} = \tau_{z\theta}$) を制御できる。言い換えれば3主応力 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) と最大主応力 σ_1 の方向 (α) を制御できることを意味する。

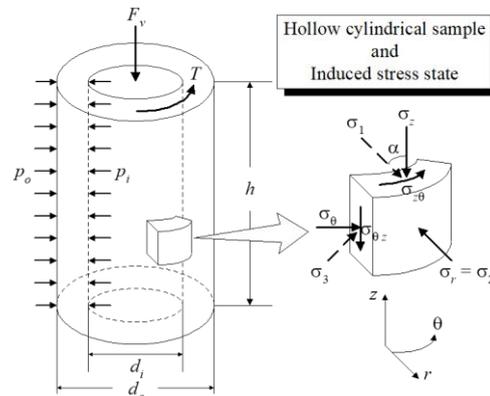


図-4 中空ねじりせん断試験の作用応力

2.2 試験方法

本研究では、豊浦砂を対象とし、条件を $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

0°の場合、以下の4つの条件を与えた。

- ・条件1 一定ひずみ速度での載荷
一定の速さで繰返しせん断を行うことで一定ひずみ速度での載荷を行う。
- ・条件2 主応力方向= 一定
任意の最大主応力 σ_1 の方向を変えることで角度 (α) を与え、一定になるように制御する。
- ・条件3 中間主応力係数 $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \text{一定}$

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、供試体の圧縮を表す。

- ・条件4 平均全応力 $p = (\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r) / 3 = \text{一定}$
平均全応力とは3つの垂直応力 ($\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$) の平均を表した値である。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。

3. 試験結果

3.1 $\alpha=0^\circ$ (p =一定制御)

応力経路を図-6に示す。図-6より、測定結果がなめらかでなく、制御が難しいことがわかる。

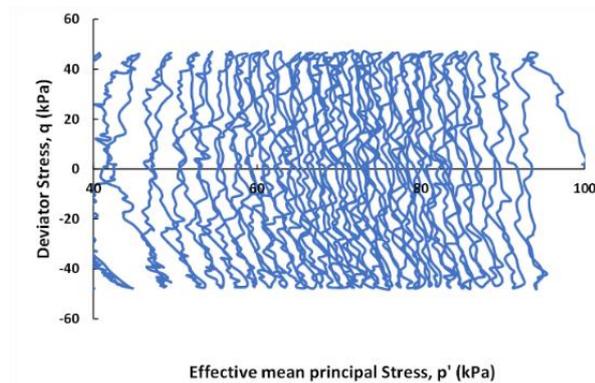


図-6 $\alpha=0^\circ$ (p =一定制御)の応力経路図

3.2 試験方法の改良

試験結果より、原因を考察したところ条件4の平均全応力= 一定が制御を行う上で大きな負荷になっているのではないと考えた。平均全応力を一定にするためには外セル圧 P_0 をすばやく変化させる必要がある。しかし、試験機の外セルの体

積(空気)は大きく、すばやく変化させるには制御の負担が大きく困難であるため、条件4を外セル圧 $P_0 = \text{一定}$ に変更して試験を行い、従来の方法との比較を行った。

3.2.1 $\alpha=0^\circ$ (P_0 =一定制御)の試験結果

図-7をみると p =一定制御と比べると、よりなめらかな測定結果が得られるようになったことが図から見てとれる。ただし、今後の装置の開発も考慮して、より一般的な制御である「平均主応力一定」を採用した。

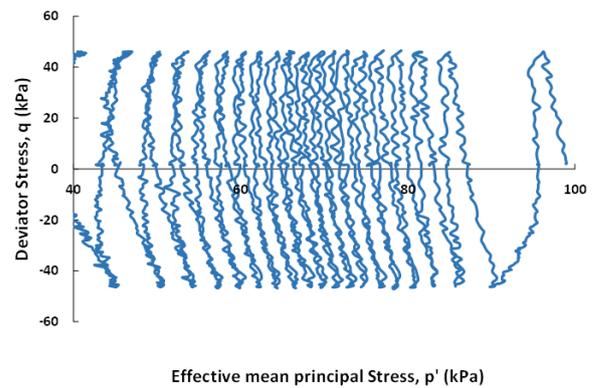


図-7 $\alpha=0^\circ$ (P_0 =一定制御)の応力経路図

3.3 試験条件の変更による試験結果への影響

3.3.1 $\alpha=30^\circ, b=0.5$

試験条件の変更より、得られる結果にどのような影響があるのかを液状化試験を行い検証した。「平均主応力一定」と「中空外圧一定」の試験条件での $\alpha=30, b=0.5, q=40$ における液状化試験の応力経路を図8, 9に示す。

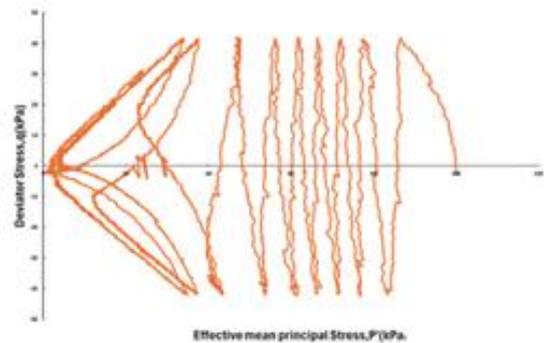


図-8 (p =一定制御)

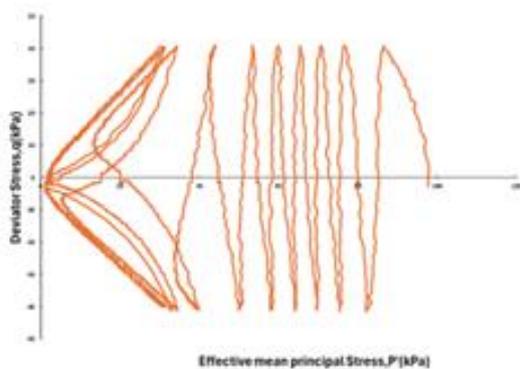


図-9 (P_0 =一定制御)

液状化までの応力経路の傾向、液状化に至るまでの繰返しせん断の回数も一致したことからほぼ同じ結果が得られている。この結果から試験条件の変更による試験結果への影響は少ないと考えられる。

3.4 せん断時回転方向の試験結果への影響

液状化試験を行うにあたって、三軸試験と同様に中空ねじりせん断試験機でも、正転に対し、反転が存在する。反転の角度は、三軸試験と同様、正転に対し 90° 変わることになる。そこで、反転角から試験を行った際、試験結果にどのような影響があるのか検証した。

正転開始、反転開始における液状化試験の応力経路を図 10, 11 に示す。

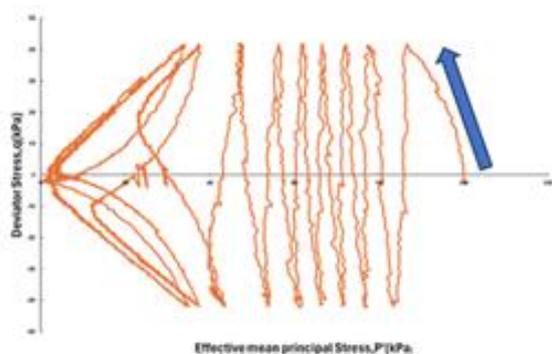


図-10 $\alpha=30^\circ$ (P =一定)

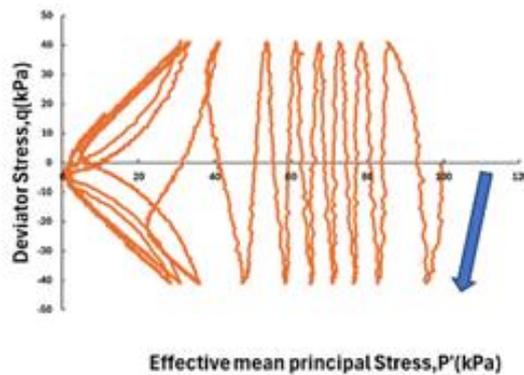


図-11 $\alpha=60^\circ$ (P =一定)

応力経路を比較したところほぼ同じ結果が得られた。液状化試験における反転角からの試験実施の結果への影響は小さいと考えられる。

4. 単調載荷試験

中空ねじりせん断試験装置で液状化試験を行えることを確認したので、主応力方向の違いにおける液状化強度の違いを検証することにした。繰返しせん断で液状化試験を行う前に、反転載荷の影響を除いた、主応力方向一定の非排水強度のデータを取るため、単調載荷試験を行った。最初に原位置の状態に最も近い、単純せん断状態で行った。その際得られた b 値をその後の単調載荷試験で使用して検証を行っていく。

単純せん断で得られた主応力方向 α -ひずみ関係、 b 値-ひずみ関係を図 12, 13 に示す。

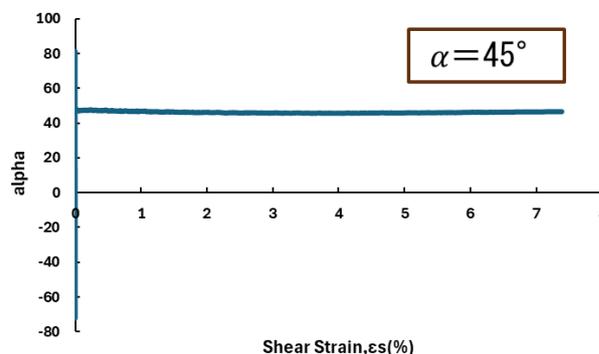


図-12 α -ひずみ(単純せん断)

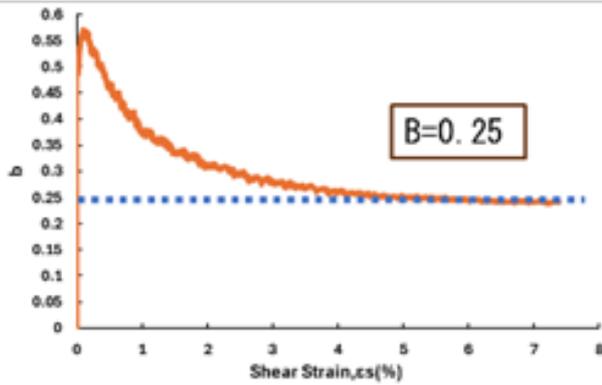


図-13 b 値-ひずみ (単純せん断)

α は 45° に b 値は 0.25 に収束する結果となった。次に $b=0.25$ の条件で、 α を変化させて、単調載荷試験を行った。

図 14, 15 に現在収集できているデータを示す。

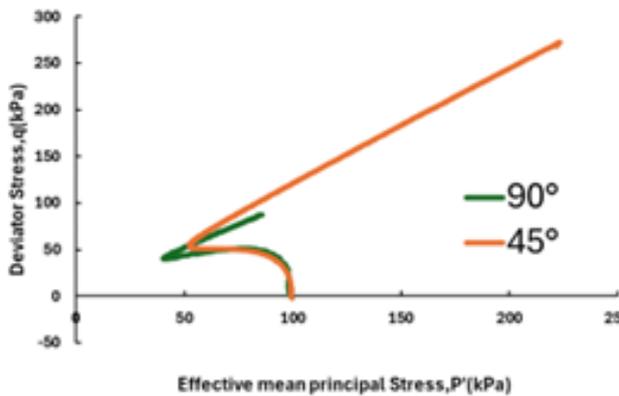


図 14 応力経路

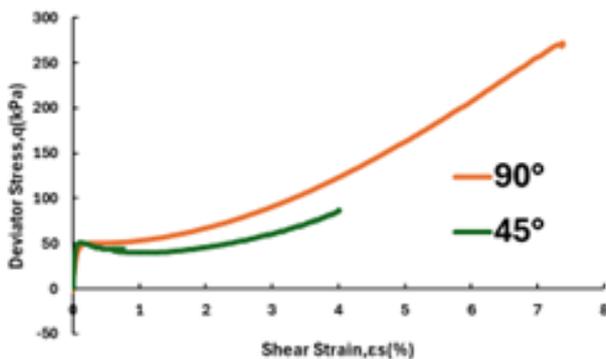


図 15 応力ひずみ

データ数は少ないが主応力方向が大きくなるほど非排水せん断強度が弱くなるのではないかと推測できる結果になった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 中空ねじりせん断試験装置で、主応力方向 α と中間主応力係数 b を制御できる単調載荷試験および液状化試験を行うことができた。
2. (平均主応力 p =一定と外セル圧 P_o =一定) の比較を行い、外セル圧 P_o =一定制御で、よりなめらかな結果が得られることがわかった。
3. p =一定と P_o =一定の液状化試験では、ほぼ同じ結果が得られた。したがって、液状化試験では、 α , b , 繰返し偏差応力 q によって結果が決まる。
4. 液状化試験における反転角からの試験実施は結果への影響は小さい。
5. 原位置の状態に最も近いと考えられる単純せん断状態で単調載荷を行ったところ、 b は 0.25 に収束した。
6. 主応力方向が大きくなるほど非排水せん断強度が弱くなる結果が得られている。

6. 今後の展望

本研究では $b=0.5$ の条件で主応力方向 α を変化させた液状化試験の実施試験を行っていたが、今後は、 $b=0.25$ の条件でデータ収集を行う。

7. 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。