

初期構造異方性を有する砂の非排水繰返しせん断挙動に対する

FLIP プログラムの適用性検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

1970年代より行われている砂の固有異方性に関する研究により、固有異方性が砂の変形・強度特性に影響を与えることが報告されている¹⁾。さらに近年では、固有異方性を考慮した構成式が提案されており²⁾、その適用性について報告されている³⁾。しかし除荷過程を含めた繰返しせん断挙動については、固有異方性に着目した砂の繰返しせん断挙動に関する研究例が少なく、検証されていない。そのため本研究では、堆積角度を変えた供試体を用いて中空ねじり試験を行い、固有異方性が砂の非排水繰返しせん断挙動に与える影響について調べた。また、固有異方性を考慮した有効応力解析により中空ねじり試験を再現し、固有異方性の影響を評価することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 中空ねじり試験

中空ねじり試験には京都大学防災研究所土質実験室の振動試験システムを用いた。高さ 100 mm、外径 100 mm、内径 60 mm の凍結供試体を作製するにあたり、発砲ポリスチレン製の容器に珪砂 6 号を空中落下法で堆積させた後に脱気水を注入し凍結させた。その後、容器を分解して凍結させた珪砂 6 号を取り出した。取り出した珪砂 6 号を所定の角度 θ ($^{\circ}$) に傾けて成型し、モールド等を用いて直径 100 mm、高さ 100 mm の円柱型の凍結供試体を作製した (図 1 左) (ここに、角度 θ は砂の堆積角度に相当する)。円柱型の凍結供試体に、モールドと直径 60 mm の穴の開いたカラーを取り付け、カラーに空いた穴に沿って中空部を成型し、中空円筒型の供試体を作製した (図 1 右)。また作製途中で適宜、再凍結させることで、凍結供試体の融解による乱れの影響を小さくした。

以上のように作製した凍結供試体を用いて、せん断応力比 (0.22, 0.24, 0.28) と堆積角度 (0° , 45° , 90°) を変えて全 9 ケースの非排水繰返しせん断試験を行った。なお、本研究では堆積角度と主応力方向角の差 $\delta (= \alpha - \theta_0)$ を比較する際の指標として用いる。



図 1 成型した中空円筒供試体

(左: 円柱型に成型後, 右: 中空部成型後)

(2) 有効応力解析

粒状体におけるマクロな有効応力は、種々の方向を向くミクロな粒子接触力 \mathbf{P} (法線方向及び、接線方向 f_n, f_t) の集合体 (体積平均) として以下のようにあらわされる。

$$\boldsymbol{\sigma}' = m_v \bar{f}_0 \left[\int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_n(\theta) E(\theta) \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} d\theta + \int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_t(\theta) E(\theta) \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} d\theta \right] \quad (1)$$

$$F(\theta - \theta_0) = 1 + a_1 \cos 2(\theta - \theta_0) + a_2 \cos 4(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

ここに、式(2)の F は、固有異方性を考慮するために導入された関数である。 F における a_1, a_2 は固有異方性の程度を、 θ_0 は固有異方性の方向を表すパラメータである。

実験結果のフィッティングを基に液状化パラメータを決定し、中空ねじり試験の再現解析を要素シミュレーションにより行った。再現解析では、実験における堆積角度の違いをパラメータ θ_0 により考慮した。なお、残る異方性パラメータは、 $a_1 = 0.12, a_2 = 0.085$ とした。

3. 得られた成果

(1) 中空ねじり試験

図2に中空ねじり試験により得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。堆積角度ごとの過剰間隙水圧比の時刻歴を比較すると、 $\delta=0^\circ$ 、 -45° のケースでは、過剰間隙水圧の上昇が $\delta=45^\circ$ のケースに比べて早く、固有異方性が過剰間隙水圧比に影響を及ぼすことがわかる。また、図3に示す液状化強度曲線より、液状化強度に堆積角度に応じた固有異方性の影響が見られ、堆積角度が 45° や 90° の供試体は、 0° の供試体に比べて強度が低いことが示された。ただし、繰返しせん断応力が大きくなると、固有異方性の影響が小さくなる傾向にあるようである。

(2) 有効応力解析

図3に解析により得られた液状化強度曲線を示す。実験結果と同様に、 $\delta=-45^\circ$ のケースが他の堆積角度のケースよりも液状化強度が比較的低いことがわかる。しかし、 $\delta=\pm 45^\circ$ の場合の結果はほとんど等しく、これは要素シミュレーションを1要素で行ったこと等に起因すると考えられる。

また、堆積角度を変えた条件（単純せん断のため主応力方向角は 45° で一定）と、主応力方向角を変えた条件（堆積角度は 0° で一定）の違いを見るため、後者の条件で行った要素シミュレーションの結果を図4に示す。パラメータは、先の述べた解析と同じである。解析結果より、 $\delta=45^\circ$ のケースで液状化強度が低くなることがわかった。また、堆積角度を変えて行った解析結果と同様に、 $\delta=\pm 45^\circ$ の要素はほぼ同じ挙動を示した。さらに、本解析では、実験結果と同様に繰返しせん断応力比が大きくなると固有異方性の影響が小さくなるという傾向がみられた。しかし、同じ δ の有効応力解析でも、主応力方向角を変えた場合と、堆積角度を変えた場合とで、せん断強度が異なるということがわかった。今後、これらの点についてさらに検討を進める必要がある。

参考文献

1) 小田匡寛, 風間秀彦: 砂の異方性に関する基礎的研究(その1), 土と基礎, 18-8(151), pp.15-21, 1970. 2) Ueda, K. and Iai, S.: Constitutive modeling of fabric anisotropy in a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 43(3), pp. 708-737, 2019. 3) Ueda, K. and Iai, S.: Non-coaxiality considering inherent anisotropy under various loading paths in a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 45(6), pp. 815-842, 2021.

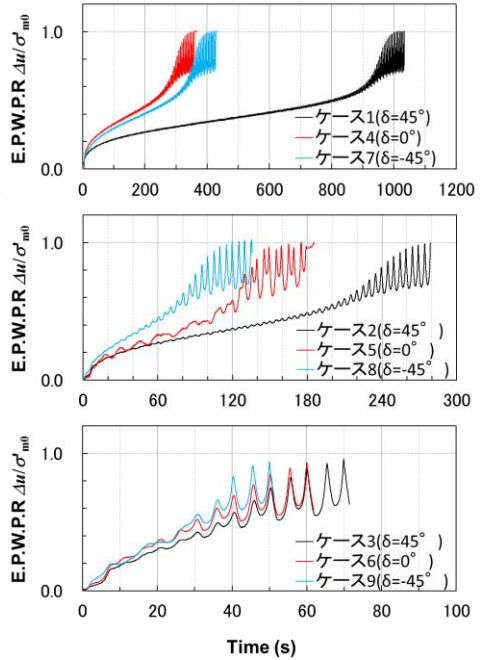


図2 中空ねじり試験における過剰間隙水圧比

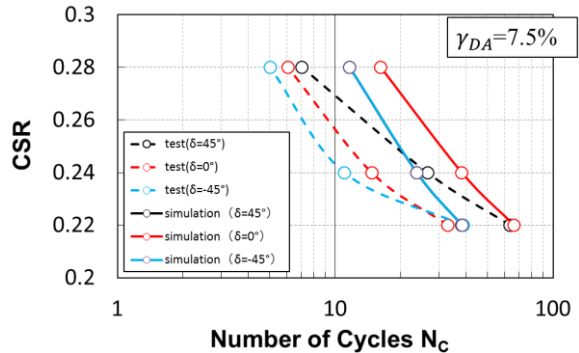


図3 中空ねじり試験と有効応力解析（堆積角度を変化）における液状化強度曲線の比較

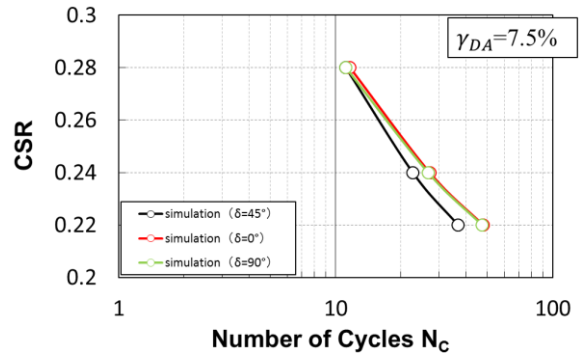


図4 有効応力解析（堆積角度一定で主応力方向を変化）における液状化強度曲線