

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04598

研究課題名（和文）固有異方性を有する地盤の動的挙動の解明とその予測モデルの高精度化

研究課題名（英文）Dynamic behavior of ground with inherent anisotropy and improvement of its prediction model

研究代表者

上田 恭平（Ueda, Kyohei）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：60649490

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：固有異方性を有する地盤を対象に、地震時の液状化に代表される動的挙動の解明に向けて、遠心場での模型振動実験と中空供試体を用いた非排水繰返しせん断試験を実施した。その結果、堆積角度に応じた地盤の固有異方性が、繰返し载荷中の応答だけでなく、過剰間隙水圧の消散を伴う振動後の挙動にも影響を及ぼすことが明らかとなった。また、固有異方性を有する地盤の力学挙動を数値シミュレーションにより精緻に予測するため、ひずみ空間多重せん断モデルと呼ばれる構成モデルの妥当性検証を行った。その結果、主ひずみと応力間の非共軸性が顕著になる複雑な地盤挙動が、固有異方性の影響を適切に考慮することで精緻に表現できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では南海トラフ地震や首都直下地震等の発生が切迫しており、液状化を始めとした地盤災害による被害形態や程度を高精度に予測する技術の確立が急務である。地盤は堆積環境等に起因した固有異方性を有しているのが一般的であるが、これまで地震時における動的応答の評価の際に、固有異方性の影響が考慮されることはほとんどなかった。本研究における遠心模型実験と室内土質試験により、地盤の動的挙動が固有異方性の影響を強く受けること、および適切な土の構成モデルを用いることでこのような固有異方性の影響を数値シミュレーションにより考慮できることが示された。これにより今後の地盤災害の予測精度の向上につながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Shaking table tests in a centrifugal field and undrained cyclic shear tests using a hollow specimen were conducted to elucidate the dynamic behavior of ground with inherent anisotropy, as typified by liquefaction during earthquakes. The results demonstrate that the inherent anisotropy of the ground depending on the deposition angle affects not only the response during cyclic loading but also the behavior after vibration with the dissipation of excess pore water pressure. In order to predict the mechanical behavior of ground with inherent anisotropy precisely by numerical simulation, a constitutive model called the strain-space multiple shear mechanism model was validated. The results show that complex geotechnical behavior, in which anisotropy between principal strains and stresses becomes pronounced, can be elaborately represented by appropriately taking into account the influence of inherent anisotropy.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：固有異方性 飽和砂地盤 液状化 遠心模型実験 中空ねじり試験 有効応力解析 構成モデル

## 1. 研究開始当初の背景

我が国では南海トラフ地震や首都直下地震等の発生が切迫しており、液状化を始めとした地盤災害による被害形態や程度を高精度に予測する技術の確立が急務である。液状化を考慮した地盤・構造物系の耐震性能評価手法としては、有効応力解析法が強力なツールと考えられる。有効応力解析による被害程度予測の実務への普及面では我が国は世界最先端であるが、従来の液状化解析では、地盤のせん断弾性係数や内部摩擦角といった力学特性に及ぼす固有異方性の影響は無視されることが多い。

堆積環境等に起因した地盤の固有異方性はその力学特性に無視できない影響を及ぼすことは、室内試験等を通して古くから指摘されている。例えば、豊浦砂を用いて実施された中空ねじり試験からは、最大主応力方向 ( $\alpha_\sigma$ ) の違いにより応力・ひずみ関係が大きく異なることが示されている。試験では堆積環境が共通で主応力方向を変化させているが、逆に主応力方向が共通で堆積環境 (例えば堆積角度) が異なる場合においても、同様に固有異方性の影響が顕在化するものと考えられる。

しかしながら、従来の固有異方性に関する研究の多くは静的かつ単調載荷条件下での土の要素挙動を対象にしており、繰返し載荷条件下での動的挙動に対する固有異方性の影響については未解明な部分が多い。そのため、固有異方性を考慮した地盤の構成モデルは散見されるものの、動的挙動に対する妥当性は十分に検討されておらず、液状化解析において固有異方性の影響が陽に考慮されることは稀である。

## 2. 研究の目的

一つ目の目的は、堆積角度を変化させた模型地盤に対して遠心力場での振動実験を実施することで、特に液状化現象に着目し固有異方性を有する地盤の動的挙動を解明することである。実験においては、各種センサーを配置して地盤内の応答加速度や過剰間隙水圧の変動、地表面の沈下量等を計測し、それらに及ぼす固有異方性の影響を定量的に把握する。さらに、ベンダーエレメントや小型コーン貫入試験機を遠心場において導入することで、異なる堆積角度を有する地盤における力学特性 (せん断弾性係数や強度定数等) の評価を試みる。

二つ目の目的は、固有異方性を有する地盤の液状化を含めた動的応答を有効応力解析により高精度に予測するため、固有異方性の影響を考慮できる地盤の構成モデルを構築することである。なお、既に申請者は粒状体に対する微視的な考察から、連続体力学に立脚した構成モデルにおいて固有異方性の影響を組み込む方法を提案している。しかし現時点では、提案モデルの適用範囲は静的かつ単調載荷条件下での土の要素挙動に限られており、繰返し載荷条件下での動的挙動に関するモデルの適用性については、妥当性検証のための実験データの不足から未検討の状態である。本申請で実施する一連の遠心模型実験との比較を通じて妥当性検証を行い、必要に応じて構成モデル (特に繰返し載荷時のダイレイタンスのモデル化) の改良を図るものとする。

## 3. 研究の方法

(1) 液状化に代表される地盤の動的挙動を対象に、固有異方性を人為的に変化させることにより、地震時の地盤応答に及ぼすその影響を定量的に評価することを目的とする。2019年度は、飽和成層地盤を対象に、地盤の動的挙動に及ぼす固有異方性の影響を解明するため、遠心力場での模型振動実験を実施した。実験には京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い、ケース間で異なる固有異方性を実現するため、実験用の剛土槽を異なる角度 (0度, 45度, 90度等) に傾斜させて乾燥砂 (豊浦標準砂) による給砂を行った。なお、給砂時の障害とならぬよう、剛土槽の左側壁は取り外し可能な仕様となっている。給砂後、間隙流体により飽和を行うことで模型地盤の完成となる。

(2) 2020年度は、地盤の液状化を含む繰返し挙動に固有異方性が及ぼす影響を要素レベルで解明するため、飽和砂供試体を用いた中空ねじりせん断試験を実施した。実験には京都大学防災研究所の中空ねじりせん断試験機を用い、ケース間で異なる固有異方性を実現するため、以下のような特殊な供試体作製方法を採用した。まず、事前に空中落下法を用いて中空供試体よりもサイズの大きいブロック供試体を作製し、飽和させたくえで凍結させた。その後、異なる方向からサンプリング (カッターによるくり抜き) を行うことで、異なる堆積角を有する中空供試体を作製した。

(3) 2021年度は、固有異方性を有する地盤の力学挙動を数値シミュレーションによる精緻に予測するため、ひずみ空間多重せん断モデルと呼ばれる構成モデルの妥当性検証を行った。このモデルは粒状体の複雑なダイレイタンス特性を考慮でき液状化解析に広く用いられているが、新たに3つのパラメータを加えることで地盤の固有異方性を考慮できるよう拡張されている。これらのパラメータのうち、 $a_1$  と  $a_2$  は固有異方性の程度を制御するもので、残るパラメータ  $a_0$  は固有異方性の主方向を表現するものである。これまで同モデルの妥当性検証は、応力とひずみ (増分) の非共軸性が問題とならない比較的単純な載荷経路における土の力学挙動を対象にし

ていたが、本研究では豊浦砂の様々な載荷経路における複雑な異方性挙動に関する室内試験データをを用いて、構成モデルの検証を実施した。

#### 4. 研究成果

(1) 飽和成層地盤を対象にした遠心力場での模型振動実験（2019年度）では、作製された模型地盤の固有異方性を正確に把握することが重要となるため、加振前から加振後に至るまで、ベンダーエレメントを用いて地盤内のせん断波速度の計測を連続的に行った（図1）。この際、鉛直・水平二方向にベンダーエレメントを設置し、固有異方性を有する地盤の伝播方向の違いによるせん断波速度変化を計測した。加振中から排水過程における地盤応答は、加速度計、間隙水圧計、レーザー変位計により定量的に把握した。その結果、堆積角度に応じて振動中の応答だけでなく、過剰間隙水圧の消散過程においても固有異方性の影響が無視できないことが示された。また、振動中における異方性の影響は、入力加速度振幅、もしくは過剰間隙水圧の上昇量に大きく左右されることも明らかとなった。ただ、せん断波速度と堆積角の間には明瞭な関係性を見いだせなかった（図2）。

(2) 特殊な供試体作製方法により作製した飽和砂供試体を用いた中空ねじりせん断試験（2020年度）の結果、等しい繰返しせん断力が作用する条件では、過剰間隙水圧の変化量やせん断ひずみの伸び方が、堆積角度に応じた固有異方性の影響を受けることが明らかとなった。

また、中空ねじり試験により得られた結果を、固有異方性の影響を考慮できる2次元の有効応力解析によりシミュレートできるかどうか検討した。その結果、固有異方性に関連する構成モデルの入力パラメータを適切に設定することで、実験で見られたような堆積角度に応じた応答の違いを定量的には表現可能であることが明らかとなった（図3）。一方、実験におけるすべての堆積角度に対して定量的に妥当な解析結果に至っているわけではないことから、今後さらに研究を進める必要があると考えられる。

(3) 種々の載荷経路における複雑な異方性挙動に関する室内試験データを対象にした数値シミュレーション（2021年度）の結果、異方性モデルパラメータの導入により、実験的に観測された歪んだ形状（例えば、楕円等）のモール円を適切に表現できることが示された。また、特に弾性挙動が支配的である負荷の初期段階の挙動を精緻に評価するためには、固有異方性に依存する異方的なせん断弾性係数を正しく決定することが重要であることが明らかとなった。主ひずみ方向の異なる非排水単調比例載荷においては、異方性モデルパ

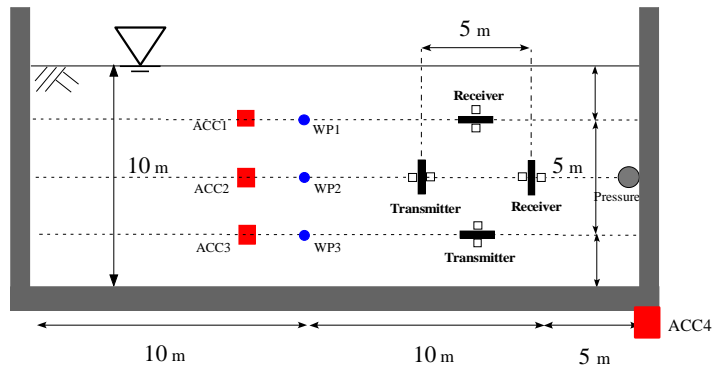


図1 遠心模型実験断面図（プロトタイプスケール）

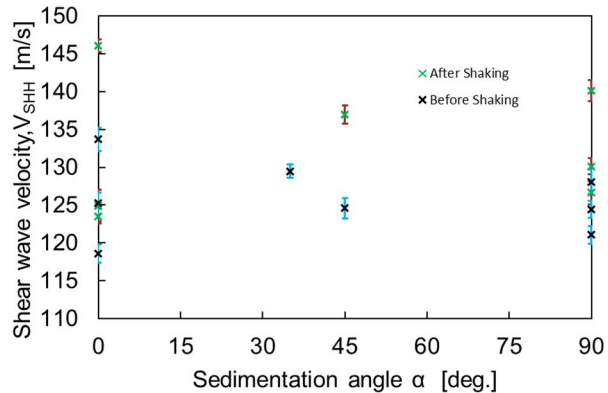
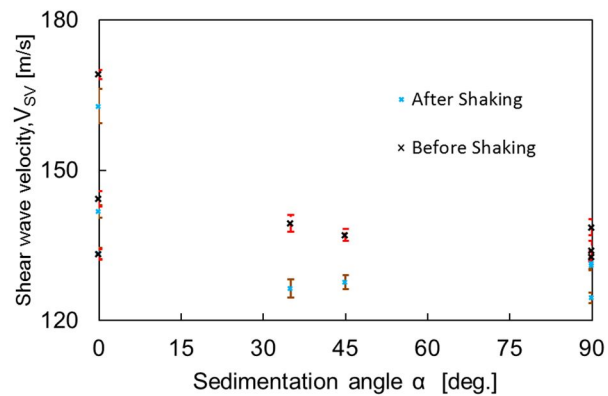


図2 加振前後のせん断波速度

（上段：鉛直方向，下段：水平方向）

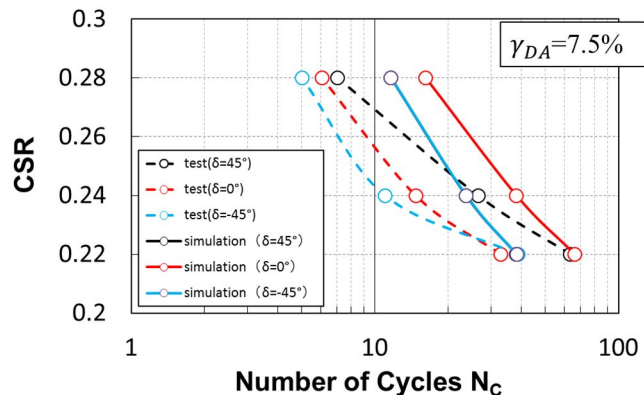


図3 中空ねじり試験と有効応力解析（堆積角度を変化）における液状化強度曲線の比較

ラメータを導入することで主ひずみと応力間の非共軸性が顕著になり、試験結果を精度良くシミュレートできることが示された。その他、主応力方向の異なる排水単調比例載荷や偏差応力一定の下での主応力軸回転といった複雑な載荷経路における土の力学挙動を精緻に予測するためには、数値シミュレーションにおいて固有異方性の影響を適切に考慮する必要があり、固有異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルは有望なモデルであると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ueda Kyohei, Iai Susumu	4. 巻 45(6)
2. 論文標題 Noncoaxiality considering inherent anisotropy under various loading paths in a strain space multiple mechanism model for granular materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 815 ~ 842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nag.3183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ueda Kyohei, Hyodo Junichi, Sato Kyohei, Sugiura Yoko	4. 巻 126
2. 論文標題 Seismic Response Analysis of Liquefiable Sandy Ground Considering Inherent Anisotropy 's Influence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Challenges and Innovations in Geomechanics (IACMAG 2021)	6. 最初と最後の頁 701 ~ 709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-64518-2_83	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueda Kyohei, Uratani Keita, Iai Susumu	4. 巻 59
2. 論文標題 Influence of inherent anisotropy on the seismic behavior of liquefiable sandy level ground	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 458 ~ 473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2018.12.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------