

不飽和マイカ混じり砂の微小ひずみ変形特性

地盤工学研究室 木村 洸太
指導教員 豊田 浩史

1. 背景および目的

現在飽和土や乾燥土の力学モデルについては多数報告されているのに対し、不飽和土のモデルはいくつか報告されてはいるものの、未だ解明には至っていない。その理由として、不飽和土はサクシオンや水分保持特性など、飽和度に比べ様々な影響を考慮しなければならないためである。しかしながら、地盤の変形や斜面崩壊等の災害への安全性を正確に評価するには、不飽和土の力学特性を明らかにしなければならない。また地震応答解析や振動解析などの地盤解析には、微小ひずみ領域におけるせん断剛性などの各種変形係数が必要となるが、不飽和土を対象とした微小ひずみ領域における研究例は少ないのが現状である。

本研究室では、微小ひずみ領域における固有異方性による土粒子の変形挙動について研究してきた。その成果^{1), 2)}として、

- ・扁平性の小さい、もしくは無い土粒子でも固有異方性が発現する
- ・扁平な土粒子を多く含有するほど、異方性の発現が大きい

といったことが挙げられる。しかしこれらの成果は、飽和試料を対象とした試験結果であり、不飽和試料を対象とした試験は、本研究室では未実施であった。

そこで本研究では飽和・不飽和試料を対象とし、堆積角度 α の異なる供試体を作製した。その後、三軸圧縮試験機を用いてベンダーエレメント試験（以下 BE 試験）および局所ひずみ測定試験（以下 LSS 試験）を実施した。それら試験から得られた結果を用いて、不飽和状態における土粒

子の微小ひずみ領域における力学特性異方性について考察することを目的とした。

2. 試験概要

2.1 使用試料

本研究では豊浦砂およびマイカを使用した。豊浦砂は日本の土質試験における標準砂であり、マイカは粒子が薄片状のため扁平性が大きく、圧縮性、破砕性も有する特徴がある。今回の試験において、マイカは豊浦砂の質量比で5%、10%で混合した。各試料の物理的性質を図-1に示す。

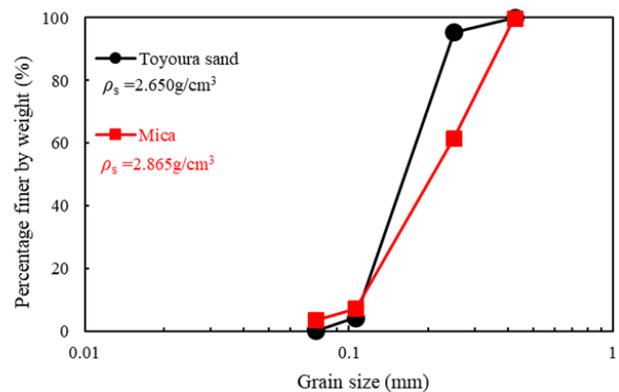


図-1 使用した試料の物理的性質

2.2 供試体作製方法

供試体作製方法として、乾燥振動法と空中落下法の2種類を採用した。空中落下法とは試料をふるい上からモールド内に一定高さで自然落下させ堆積させる方法である。一方、乾燥振動法では試料をモールド内に定量落下させ、1層につき100回ほどモールド側面を叩き、10層に分けて堆積させる方法である。供試体作製後、トリミング法

により直径 50mm, 高さ 125mm の円柱状に成形した。

堆積角度 α は, 両方法で 0° , 22.5° , 45° , 67.5° , 90° に対して実施した。堆積角度 α は図-2 に従って定義した。

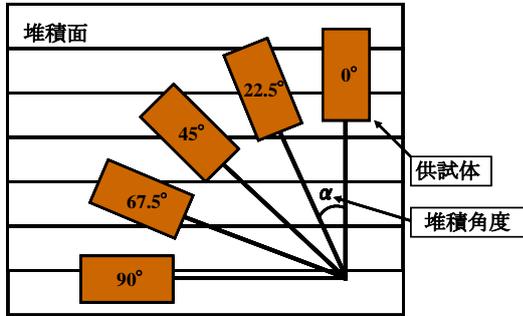


図-2 堆積角度 α の定義

2.3 試験方法

2.3.1 飽和試験

供試体を三軸試験機に設置後, 二重負圧法で供試体を飽和させた。飽和度を上昇させるため背圧 200kPa を作用させ, 有効拘束圧 150kPa で等方圧密を行った。その後排水条件のもと, BE 試験, LSS 試験を実施した。

2.3.2 不飽和試験

供試体を三軸試験機に設置後, 二重負圧法で供試体を飽和させ, 有効拘束圧 150kPa で等方圧密を行い, BE 試験を実施した。その後サクシオン一定 ($u_a - u_w = 50\text{kPa}$) のもと, 供試体内の水分を排水する脱水過程を行った。任意時間脱水後, 再度 BE 試験を実施し, その後 LSS 試験を行った。

2.4 ベンダーエレメント (BE) 試験

三軸試験機のキャップおよびペDESTAL にベンダーエレメントを装着し, 供試体の軸方向に伝播するせん断波を測定した。本研究では送信波条件を, 波形: sin 波, 電圧: $\pm 10\text{V}$, 周波数: 15kHz, 20kHz, 30kHz として行った。また, 伝

播時間の同定法は T.D.法の start-to-start を適用した。

せん断波速度 $V_s(\text{m/s})$ およびせん断剛性 $G(\text{kPa})$ は Eq.(1)にて算出した。ここに, せん断波の伝播距離 $L(\text{m})$, せん断波の伝播時間 $\Delta t(\text{s})$, 湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$ である。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad G = \rho_t V_s^2 \quad (1)$$

2.5 局所ひずみ測定(LSS)試験

排水条件において, 局所軸ひずみ ε_a および局所せん断ひずみ ε_s が 0.1% に達するまで, せん断速度 0.0025mm/min でせん断を行った。

LSS 試験では軸変位および側方変位の測定には, 非接触型変位計を使用しており, 局所軸変位測定に 2 箇所, 局所側方変位測定に 1 箇所設置した。これらから, 局所軸ひずみ ε_a および局所側方ひずみ ε_r を直接測定し, 各種変形係数を Eq.(2)にて算出した。ここに, 軸差応力 $q(\text{kPa})$, 有効軸応力 $\sigma'_a(\text{kPa})$, 有効側方応力 $\sigma'_r(\text{kPa})$, 割線ヤング率 $E(\text{kPa})$ である。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r \quad E = \frac{q}{\varepsilon_a} \quad G = \frac{q}{3\varepsilon_s} \quad (2)$$

3. 試験結果

3.1 割線せん断剛性-せん断ひずみ関係の結果

飽和・不飽和状態の試料を対象に実施した LSS 試験により得られた割線せん断剛性-せん断ひずみ関係の結果を図-3~10 にそれぞれ示す。豊浦砂単体試料, マイカ混合砂ともに堆積角度の大小関係とせん断剛性には相関関係があることが確認できる。このことから, 土粒子の異方性による影響が発現していることが確認できる。また全試料共通で飽和状態よりも不飽和状態のせん断剛性が強いことも確認できる。

豊浦砂単体試料において, 空中落下法と乾燥振動法では, 乾燥振動法のせん断剛性が飽和・不飽

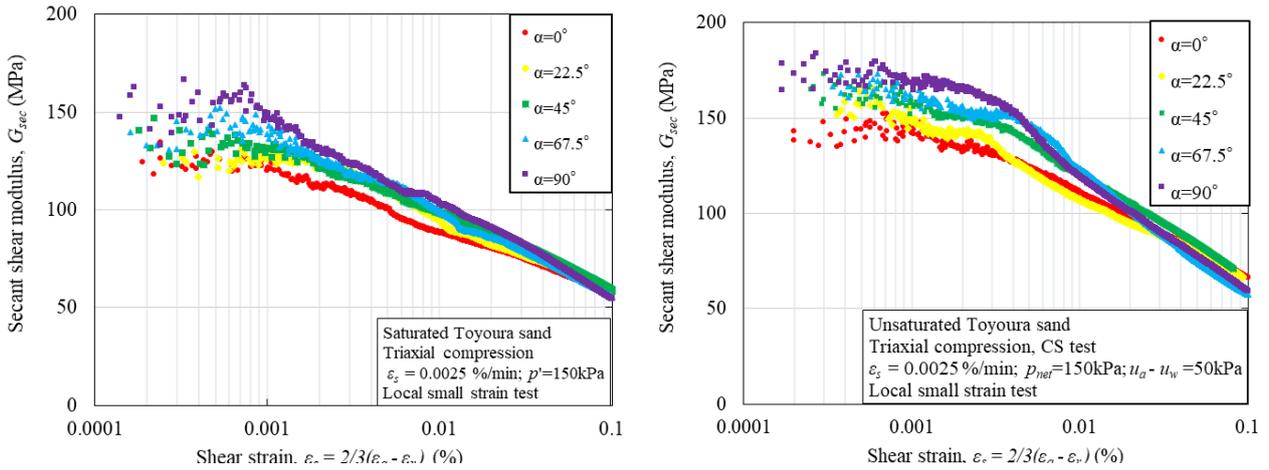


図-3, 4 空中落下法による豊浦砂の割線せん断剛性-せん断ひずみ関係
(左図：飽和状態 右図：不飽和状態)

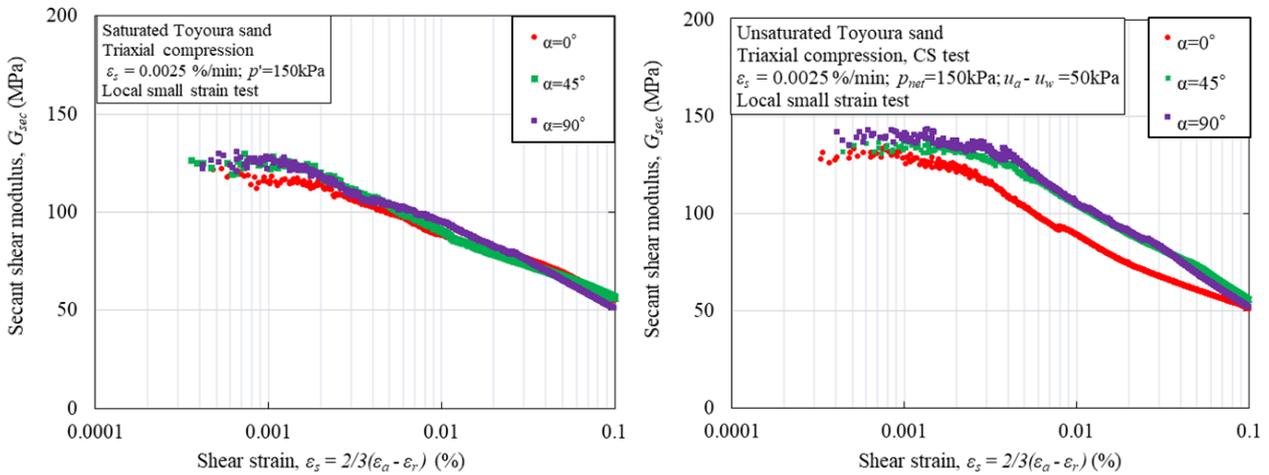


図-5, 6 乾燥振動法による豊浦砂の割線せん断剛性-せん断ひずみ関係
(左図：飽和状態 右図：不飽和状態)

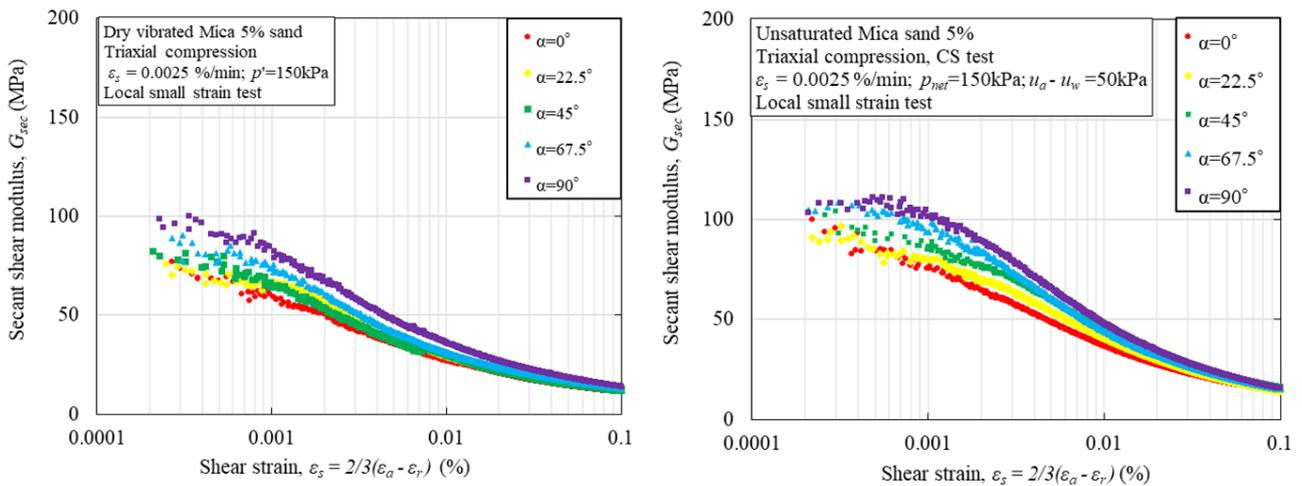


図-7, 8 乾燥振動法によるマイカ混入率5%の割線せん断剛性-せん断ひずみ関係
(左図：飽和状態 右図：不飽和状態)

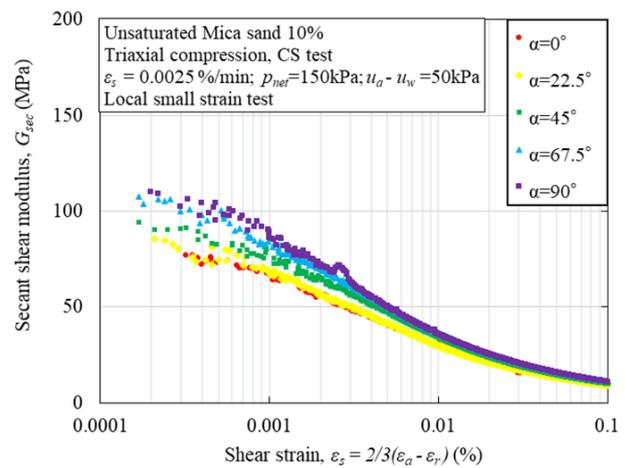
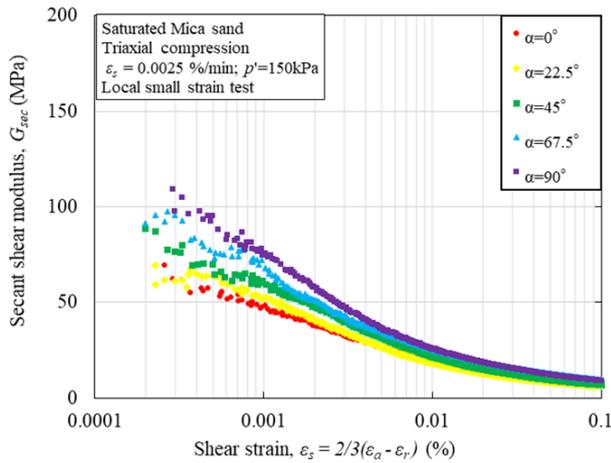


図-9, 10 乾燥振動法によるマイカ混入率 10%の割線せん断剛性-せん断ひずみ関係
(左図：飽和状態 右図：不飽和状態)

和状態共に、空中落下法により得られたせん断剛性よりも、全堆積角度で小さいことがわかる。既往研究¹⁾で、乾燥振動法よりも空中落下法の方が土粒子の配向性につきやすいことが確認されているため、その影響でせん断剛性に差が見られたのだと推察する。

3 試料ともにひずみが小さい段階では、堆積角度の大きいケースのせん断剛性が大きい、ひずみが大きくなるにつれて、豊浦砂単体試料では関係性が逆転し、堆積角度の小さいケースが大きくなるのに対し、マイカ混合試料では収束していくことがわかる。また、マイカ混入率が増えるにつれて全堆積角度でせん断剛性が小さくなっていることも確認できる。

3.2 初期せん断剛性-堆積角度関係の結果

飽和・不飽和状態の試料を対象に実施した BE 試験および LSS 試験より得られた初期せん断剛性-堆積角度関係を図-11~14 に示す。BE 試験および LSS 試験において豊浦砂単体試料、マイカ混合砂ともに堆積角度が大きくなるに伴い、せん断剛性も大きくなることが確認でき、不飽和状態の方が飽和状態よりもせん断剛性が大きいことがわかる。またマイカが混入するとせん断剛性全体が低下する傾向が、BE・LSS 両試験および飽和・不飽和状態共通で見られる。

しかしながら、飽和・不飽和状態共に LSS 試験で得られた初期せん断剛性と BE 試験で得られた初期せん断剛性に差異が見られ、マイカ混入砂においては、LSS 試験で得られた値は、BE 試験で得た値より小さくなることを確認できる。

各試料の固有異方性の発現の影響を確認するため、各試験から得られたせん断剛性を正規化した結果を図-15~18 にそれぞれ示す。全ての試料で両試験共に堆積角度増加に伴い、正規化したせん断剛性値が大きくなっている。また扁平性の大きいマイカを多く含むほど、正規化値の増加量も大きいことから、マイカの混合量によって固有異方性の影響が大きくなることを確認できる。飽和・不飽和状態で比較すると、BE・LSS 試験共通で不飽和状態の方が大きく異方性を発現していることがわかる。

4. 考察

4.1 不飽和砂のせん断剛性増加

豊浦砂単体試料、マイカ混入試料共に飽和状態よりも不飽和状態のせん断剛性が大きくなる傾向が見られた。この理由として、サクシヨンの影響が考えられる。

不飽和状態における土粒子骨格と間隙水の分布を図-19 に示す。飽和状態では全ての間隙が水で

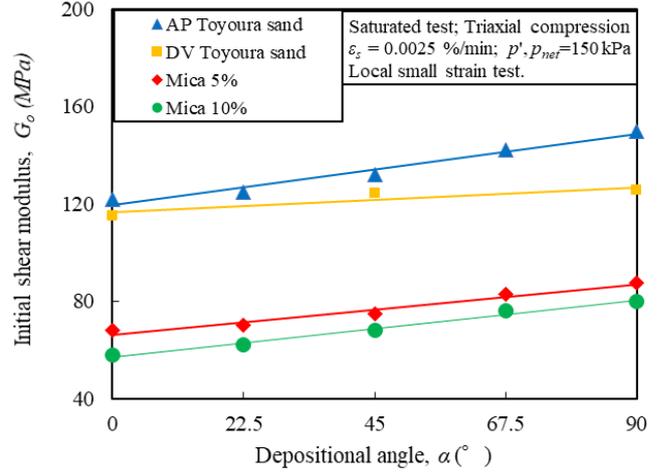
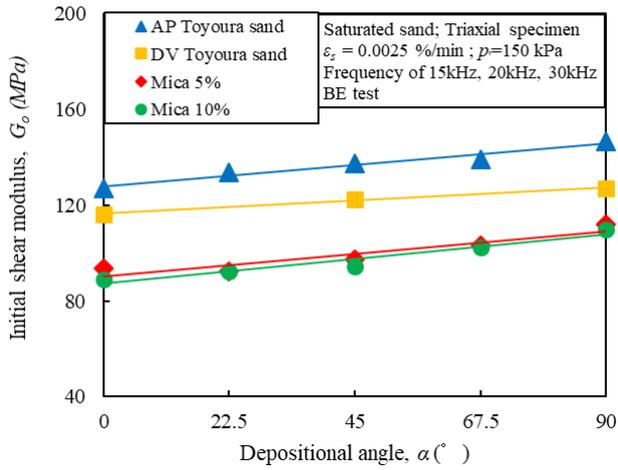


図-11, 12 飽和状態における各試験から得られた初期せん断剛性-堆積角度関係
(左図: BE 試験 右図: LSS 試験)

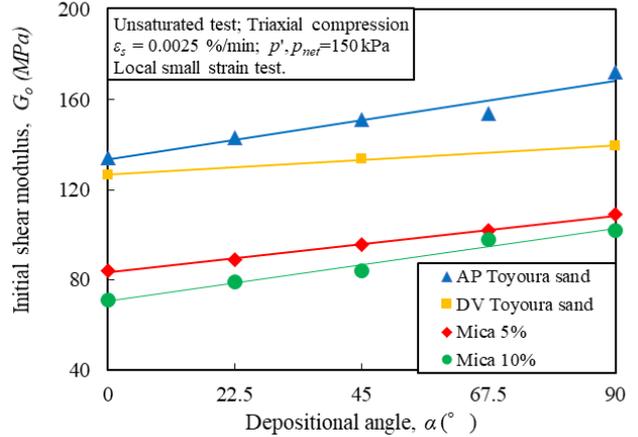
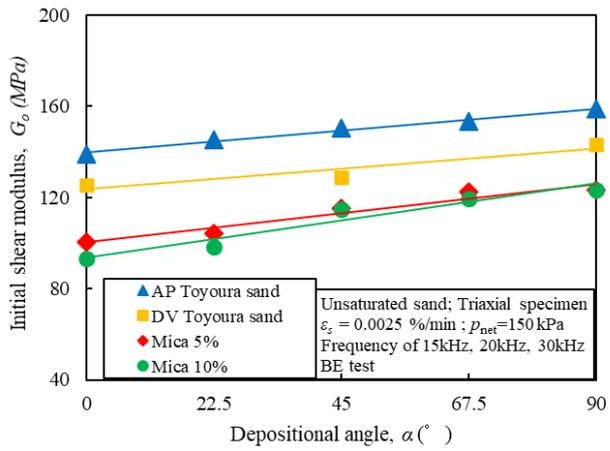


図-13, 14 不飽和状態における各試験から得られた初期せん断剛性-堆積角度関係
(左図: BE 試験 右図: LSS 試験)

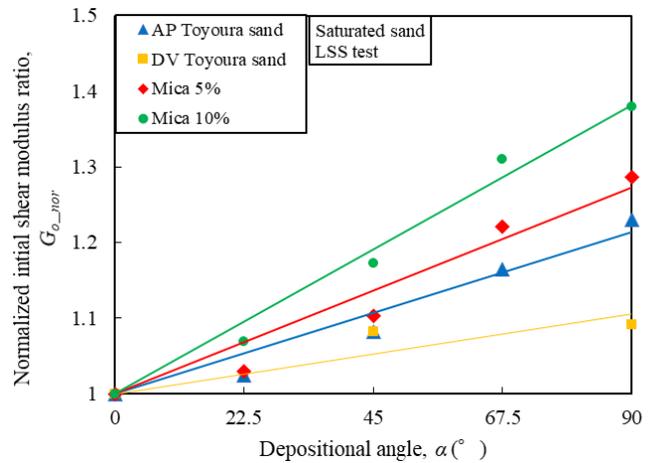
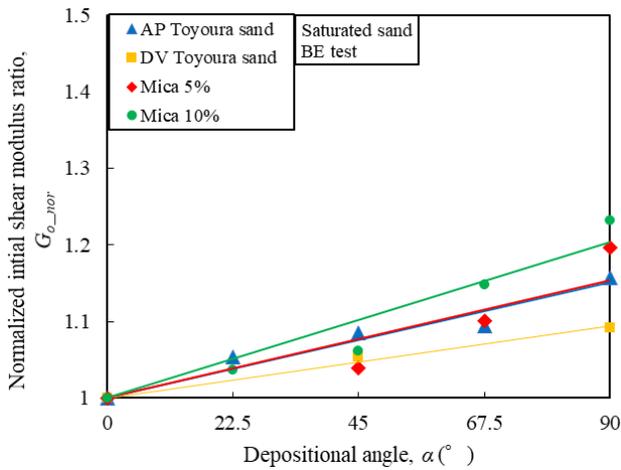


図-15, 16 飽和状態における正規化した初期せん断剛性-堆積角度関係
(左図: BE 試験 右図: LSS 試験)

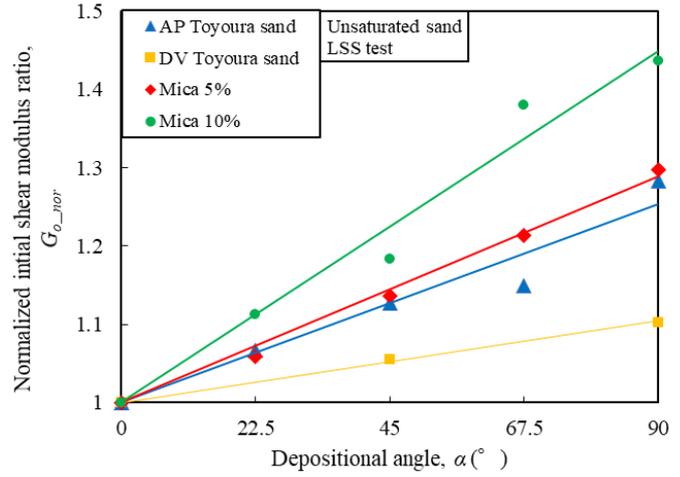
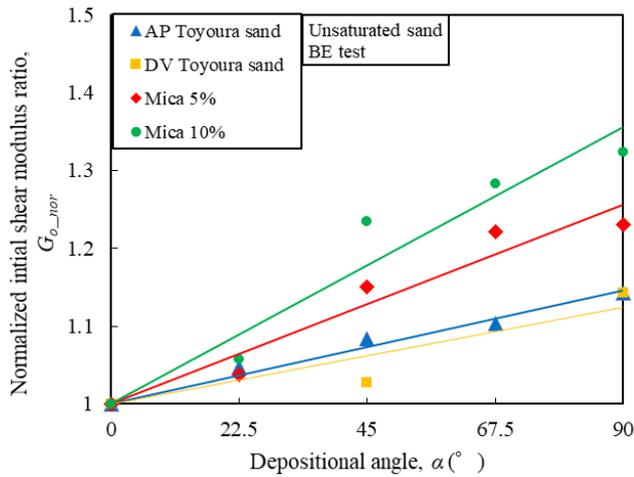


図-17, 18 不飽和状態における正規化した初期せん断剛性-堆積角度関係
(左図：BE 試験 右図：LSS 試験)

満たされているが、不飽和状態になると間隙が生じ、水分は土粒子接点にメニスカス水として分布する。その結果、メニスカス水の粒子間結合力によって粒子間の相対的な安定性が生じ、土骨格の接触力が増加したため、不飽和状態の試料のせん断剛性が増加したと考える。

4.2 堆積角度増加によるせん断剛性の増加

図-20 に、堆積角度別の土粒子堆積構造を示す。堆積角度増加に伴って同距離における土粒子同士の接点箇所が減少していることがわかる。堆積角度の大きい方が、土粒子剛体部分が大きくなり接点が減ることから、LSS 試験において各試料共通して 90° のせん断剛性が最も大きく、 0° のせん断剛性が小さくなったと思われる。

BE 試験において、計測されるせん断波の伝播速度は、剛体部では早く、土粒子接触部では遅くなると考えられる。土粒子の接触箇所は 0° で最も多く、 90° で最も少ないことから、LSS 試験の結果と同様に堆積角度の増加に伴い、せん断剛性が増加したと考える。

またマイカ混入砂において、豊浦砂単体試料と比べ各堆積角度でせん断剛性が低下したのは、どの堆積角度においても豊浦砂に比べ土粒子の接触

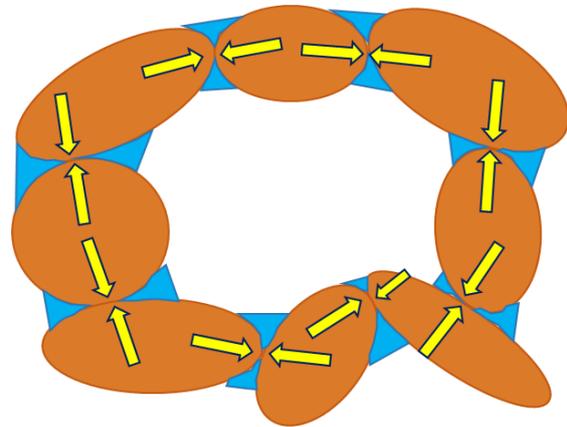


図-19 不飽和状態の土骨格と間隙水分分布

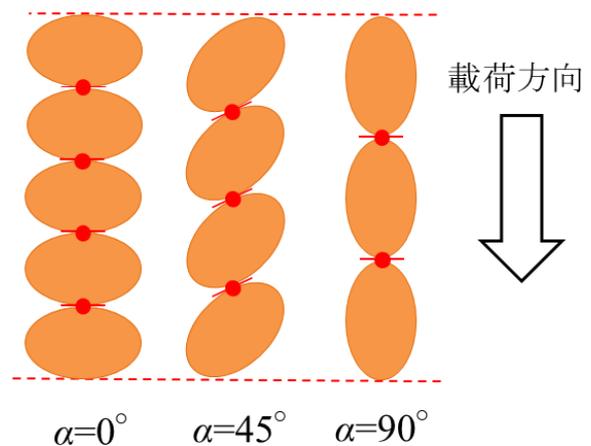


図-20 堆積角度別の土粒子堆積構造
(豊浦砂単体試料)

箇所が多くなり、剛体部分の割合が減少したため、せん断剛性が小さくなったと考える(図-21)。

4.3 BE 試験と LSS 試験のせん断剛性の差異

図-3～10において、豊浦砂単体試料のせん断剛性は、ひずみが大きくなるにつれて、剛性一定の状態から減少に転じるため、初期せん断剛性が把握でき、BE 試験で得られた初期せん断剛性との差異は小さい。しかしマイカ混入砂においては、計測範囲内では常にせん断剛性が減少しているため、正確なせん断剛性が把握できなかった。このことから、マイカ混入砂の初期せん断剛性は、本試験における計測範囲よりも小さいひずみ領域に存在していることが推測でき、そのため LSS 試験により得られた初期せん断剛性は、BE 試験で得られたものより小さくなったと考えられる。

5. 結論

本研究により得られた結果から、以下の結論を示す。

- 1) 不飽和砂の方が飽和砂よりもせん断剛性が大きい
- 2) 堆積角度増加に伴い、せん断剛性は増加する
- 3) 不飽和砂の方が飽和砂より異方性の発現が大きくなる
- 4) マイカが混入すると、LSS 試験で求めたせん断剛性は、BE 試験で求めたせん断剛性より小さくなる

【参考文献】

- 1) 高梨諒：「砂質土の力学的異方性に与える粒子形状の影響」，長岡技術科学大学修士論文，pp.70-147，2017.3
- 2) 米川幸宏：「マイカ混じり砂の変形・強度異方性に関する研究」，長岡技術科学大学修士論文，pp.70-118，2015.3

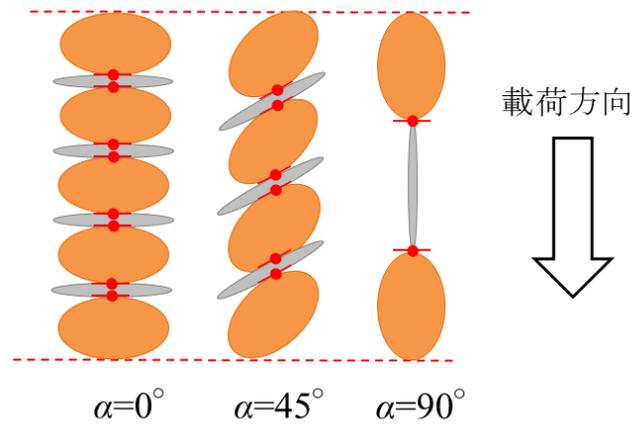


図-21 堆積角度別の土粒子堆積構造
(マイカ混入試料)