

マイカ混じり砂の変形特性に与える固有異方性の影響

地盤工学研究室 裏山 昌平
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

今後の基礎・地中構造物設計・施工では経済性、安全性を考慮した合理的な設計・施工が求められており、精度の良いせん断弾性係数が必要である。なお、実地盤の土粒子構造は、その構築過程や応力履歴に起因して異方的であることが多い¹⁾。この異方性には粒子の配向性による固有異方性、異方応力状態による誘導異方性があり、異方性が微小ひずみレベルの変形係数にどの程度影響を与えるのか詳しくわかっていないのが現状である。合理的な設計を行うためには地震応答解析等を使用する微小ひずみレベル($10^{-4}\%$ ~ $10^{-1}\%$)の変形係数を詳細に把握する必要がある。したがって、固有異方性に着目して、微小ひずみレベルの変形係数を調べることは重要である。

筆者らはこれまでの研究で、固有異方性に着目し、豊浦砂を対象に堆積方向の異なる供試体を作製した。この供試体を三軸試験機を用いて局所ひずみ測定試験、およびベンダーエレメント試験（以後、それぞれ LSS 試験、BE 試験と称す）を実施した。その結果、豊浦砂は、せん断弾性係数に対する固有異方性の影響が小さいことがわかった²⁾。また昨年度の成果より、一般的な土質材料は 0.001%ひずみまでは弾性的な挙動を示すとされているが、マイカ混じり砂は 0.001%の時点で既に弾性域ではなく、非線形であることがわかった。本年度の研究では、LSS 試験の測定精度を改良し、正確に割線せん断弾性係数を測定することで、マイカ混じり砂の変形特性に与える固有異方性の影響を明らかにする。

2. 使用試料

本研究では、標準砂である豊浦砂と扁平な土粒子であるマイカを使用した。試料の物理特性と粒径加積曲線を Fig.1 に示す。マイカは豊浦砂と同様の粒度であり、薄片状の粒子形態や圧縮性、破砕性を有する土粒子であり、土粒子密度は、 2.865g/cm^3 と大きい。試験を行なったケースは、豊浦砂に質量比で 1, 2.5, 5, 7.5, 10%のマイカを混入させたものと、豊浦砂のみの計 6 ケースについて試験を行なった。

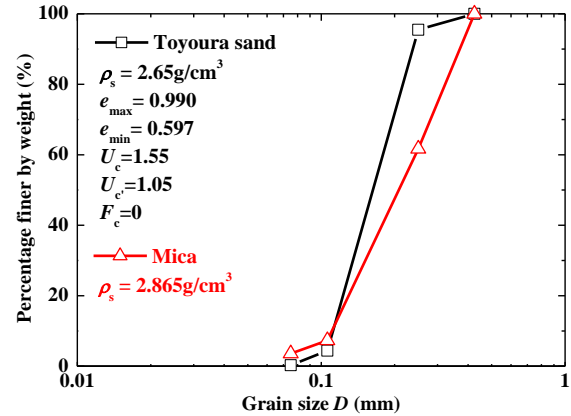


Fig.1 使用した土質材料の物理的性質

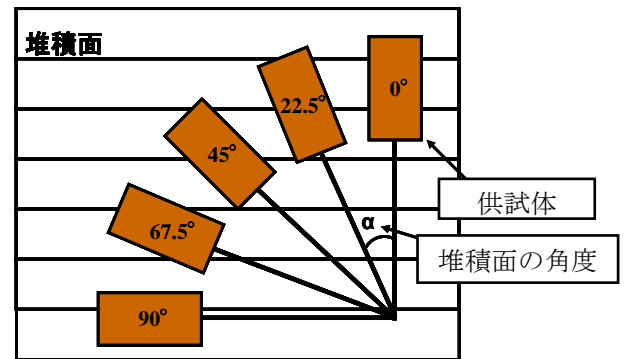


Fig.2 堆積面の定義

3. 供試体の作製方法及び試験方法

供試体は 1)モールド内に詰める試料の量を 10 層に分けて 1 層当たり約 100 回、プラスチックハンマーでモールド外部より叩いて堆積させ（振動締固め）、2) 水槽内にモールドを設置し下部より一定の流速で通水、3) 水槽内からモールドを取り出し脱水（吸引しながら一定時間放置）、4) 不飽和化で自立した試料をトリミング法により直径 50mm, 高さ 125mm の寸法に成形という手順で作製した。ここで、Fig.2 に示すように、三軸供試体軸方向に対し、堆積面が水平方向の場合を $\alpha=0^\circ$ として定義する。

試験は、二重負圧法で飽和した後、全ての堆積面の角度において背圧 200kPa を作用させ、有効拘束圧 150kPa で等方圧密を行った。その後 LSS 試験と BE 試験を行なった。

3.1 LSS 試験（局所微小ひずみ試験）

試験ではセル水に含まれる気泡の浸入で飽和度が下がるという問題に対処するため、三軸室内を脱気水で満たし、通気性の小さいバルーンを用いて空圧制御を行った。三軸試験機は非接触型変位計を使用しており、局所軸変位測定に二箇所、局所側方変位測定に一箇所設置した。以上より、局所軸ひずみ $\varepsilon_a(\%)$ 、および局所側方ひずみ $\varepsilon_r(\%)$ を直接測定し、Eq.(1)を用いて各種変形係数を求めた。ここで、 ε は収縮方向を正の値、膨張方向を負の値とし、 q は軸差応力(kPa)、 σ'_a は有効鉛直応力(kPa)、 σ'_r は有効側方応力(kPa)、 E は割線ヤング率(MPa)、 ν はポアソン比、 G は割線せん断弾性係数(MPa)である。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r, \quad E = \frac{q}{\varepsilon_a}, \quad \nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}, \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \dots (1)$$

3.2 BE 試験 (ベンダーエレメント試験)

三軸試験機のキャップおよびペデスタルに BE を装着し、圧密終了後、三軸供試体の軸方向に伝播する波を測定した。本研究では送信波条件を、砂質土で推奨されている波形: sin 波, 電圧: $\pm 10V$, 周波数: 10kHz, 15kHz, 20kHz として行った。送受信波伝播時間 Δt とベンダー間距離 L よりせん断波速度 V_s を算出し、 V_s の二乗に湿潤密度 ρ_t を乗じ (Eq.(2)) せん断弾性係数 G を求めた。また、伝播時間の同定法は T.D.法の start-to-start を適用した。

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

4. 実験結果と考察

Fig.3 に全ケースの間隙比 e と堆積面 α の関係を示す。一般的に三軸試験供試体の密度管理には相対密度 D_r を用いる。しかしマイカは高い圧縮性を有するため、拘束圧の大きさによって最大、最小間隙比が変化する。これらを考慮して本研究では密度の指数として間隙比 e を使用した。Fig.3 よりマイカ混合量の増加により間隙比 e が増加することが分かる。また各マイカ混合量のケースは堆積面 α によらず同程度の間隙比を示している。これよりマイカ混合量が等しいケースは定量的に比較できることがわかる。

4.1 LSS 試験

Fig.4 に割線せん断弾性係数 G と堆積面 α との

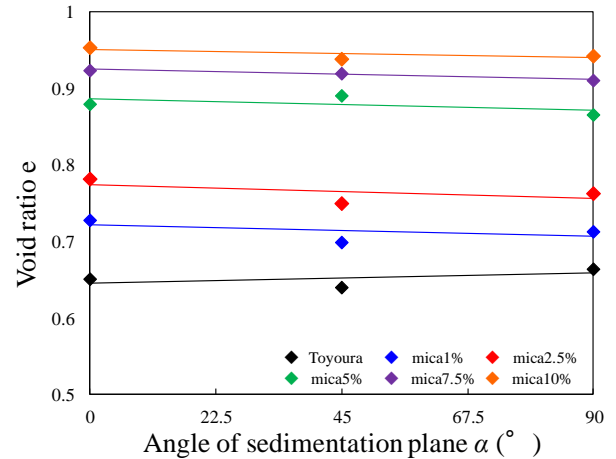


Fig.3 間隙比 e と堆積面 α の関係

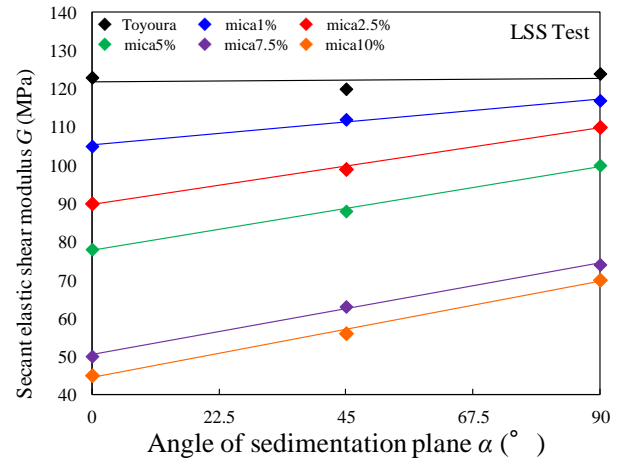


Fig.4 初期せん断弾性係数と堆積面 α の関係(LSS 試験)

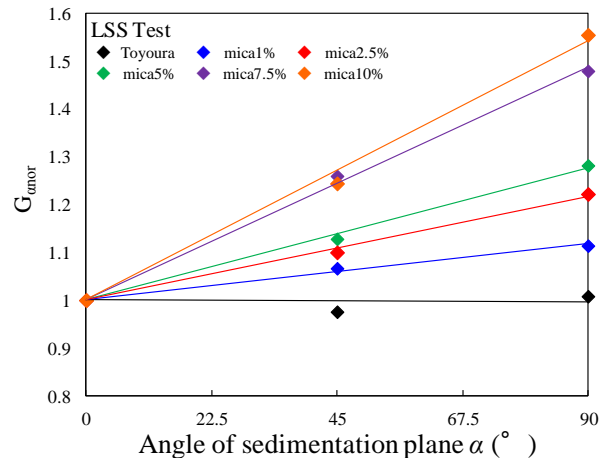


Fig.5 正規化した初期せん断弾性係数と堆積面 α の関係 (LSS 試験)

関係を示す。ここで、LSS 試験による割線せん断弾性係数 G においては、本試験で使用した LSS 試験装置の測定限界である $\varepsilon_s = 0.0003\%$ の時の値を用いた。Fig.4 より豊浦砂は堆積面 α によらずほぼ同程度の初期せん断弾性係数 G を示す。しかし

マイカ混合砂は堆積面 α の増加に伴い割線せん断弾性係数 G が増加する傾向を示した。またマイカの混入量が多くなるに伴い、割線せん断弾性係数 G は小さくなっていくが、堆積面 α に対する割線せん断弾性係数 G の傾きはほぼ一定である。

Fig.5 に LSS 試験より得られた、正規化した初期せん断弾性係数 G_{amor} と堆積面 α との関係を示す。ここで正規化したせん断弾性係数 G_{amor} とは、各堆積面 α の初期せん断弾性係数を堆積面 $\alpha=0$ の初期せん断弾性係数で除すことで算出した。この正規化により間隙比の異なる各マイカ混合砂の異方性の影響を定量的に評価することができる。

Fig.5 より Fig.4 と同様に堆積面 α の増加に伴い、正規化したせん断弾性係数 G_{amor} が増加することが分かる。またマイカ混合量が多いほど正規化したせん断弾性係数 G_{amor} の増加量が多い。これより、マイカの混合量が増加することで固有異方性の影響が増加したと考えられる。

Fig.6 に圧密時の体積ひずみ ε_v とマイカ混合量の関係を示す。これより、マイカの混合量が増加するに伴い、体積ひずみ ε_v が大きく増加していることからマイカの圧縮性が確認できた。これは圧密時に間隙が少なくなることでマイカ粒子が圧縮され、薄片状の粒子のため、曲げ変形、破碎を起こしていると推測される。

Fig.7 に堆積面 $\alpha=0$ のケースのせん断弾性係数 G とせん断ひずみ ε_s の関係を示す。豊浦砂はせん断ひずみ $\varepsilon_s=0.002\%$ 程度までせん断弾性係数 G がほぼ変化していない。一方、マイカ混合量が 2.5% 以上のケースは、測定限界である $\varepsilon_s=0.0003\%$ の時点で既にせん断弾性係数 G が低下している傾向を示している。これは Fig.6 で示した圧密時にマイカ粒子が曲げ変形、破碎しやすいためだと考えられる。载荷直後から、粒子の曲げ変形、破碎により粒子構造が変化するため、弾性域を示すひずみ範囲が小さくなっていると考えられる。

4.2 BE 試験

Fig.8 に BE 試験の予備実験の結果であるせん断波速度 V_s と入力電圧の関係を示す。BE 試験では、BE が微小に変形することで、せん断波を発生させる。発生するひずみは、一般的な土質材料であれば弾性域と考えられているが、Fig.7 で示したよ

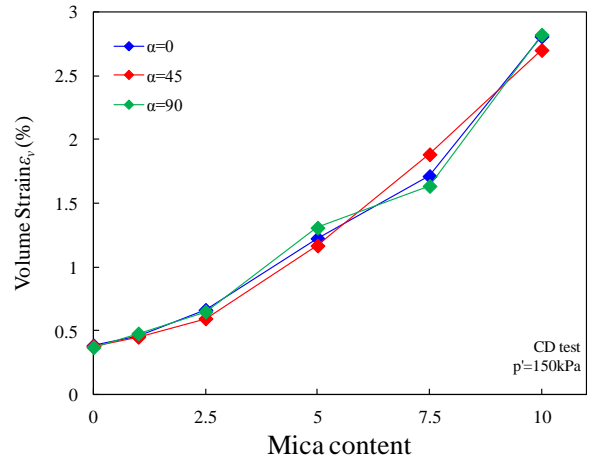


Fig.6 体積ひずみ ε_v とマイカ混合量の関係

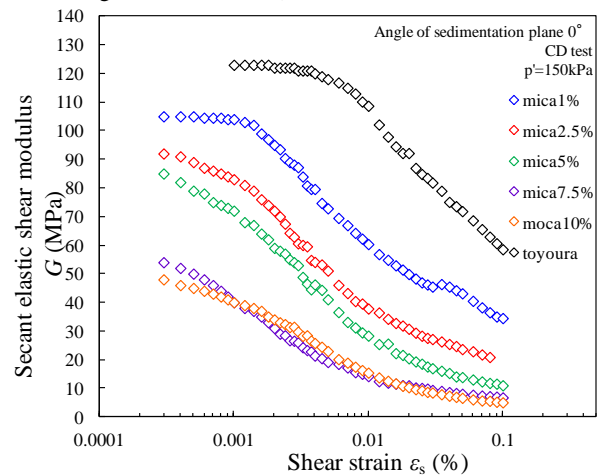


Fig.7 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係($\alpha=0$)

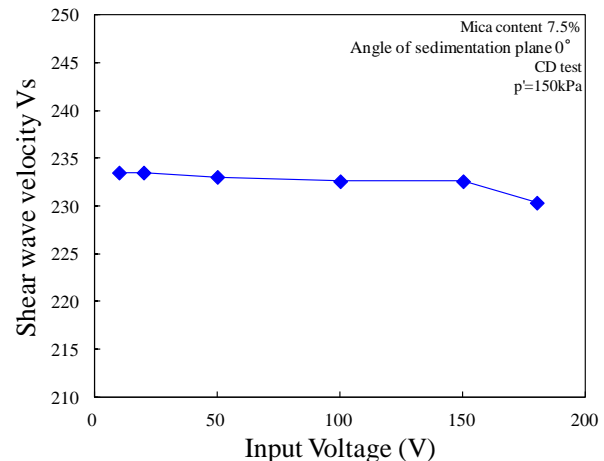


Fig.8 せん断波速度 V_s と出力電圧の関係(BE 試験)

うにマイカ混合砂の弾性域は大変小さいため、予備試験を行った。BE 試験は入力電圧に比例して、せん断波の振幅が増大する。Fig.8 より、通常の 10V の 18 倍に相当する 180V までの電圧を入力した。180V では、せん断波速度 V_s が少し小さくなっているが、それまでは同程度の V_s を示してい

る。よって、通常の BE 試験で発生させるせん断波では、せん断波速度 V_s を変化させるほどのひずみを与えていないことが分かった。

Fig.9 に BE 試験によって得られた初期せん断弾性係数 G_0 と堆積面の角度 α の関係を示す。LSS 試験同様マイカ混合砂は豊浦砂と堆積面 α の増加に伴い初期せん断弾性係数 G_0 が増加する傾向を示した。しかし、マイカ混合量 5% までのケースは、マイカ混合量の増加に伴い、初期せん断弾性係数 G_0 が低下するのに対し、7.5%、10% のケースは 5% のケースと比較して初期せん断弾性係数 G_0 が増加する傾向を示した。Fig.10 に BE 試験より得られた、正規化したせん断弾性係数 $G_{0\text{norm}}$ と堆積面 α の関係を示す。正規化した方法は Fig.5 と同様に算出した。Fig.10 より LSS 試験と同様に堆積面 α の増加に伴い、正規化したせん断弾性係数 $G_{0\text{norm}}$ が増加することが分かる。しかし、LSS 試験はマイカ混合量が増加するに伴い、堆積面 α に対する正規化したせん断弾性係数 $G_{0\text{norm}}$ の傾きが増加していたのに対し、BE 試験はマイカ混合量 2.5% 以降の正規化したせん断弾性係数 $G_{0\text{norm}}$ の傾きは同程度を示した。

Fig.11 に BE 試験より得られたせん断波速度 V_s と間隙比 e の関係を示す。また図中に示した理論式とは、微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 に関する間隙比の影響を $F(e)$ の形式で表し、拘束圧の影響を考慮して表したものである (Eq.(3))。ここで、 A, n は材料定数、 σ_0' は平均有効拘束圧を示す。

$$G_0 = 7100F(e)(\sigma_0')^{0.5} \quad \dots (3)$$

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$$

本研究で使用した豊浦砂の値に合うように材料係数を調整した結果 $A=7100$ を用いた。この定数の妥当性は、同じ供試体作製方法で間隙比の大きい豊浦砂の試験を行った結果、理論値に近い値を示したことで検証した。この理論式より算出したせん断剛性 G_0 を Eq.(2) に代入することで、理論式のせん断波速度 V_s を算出した。この理論式は間隙比 e の増加に伴いせん断波速度 V_s が低下する傾向を示す。Fig.11 よりマイカの混合量が増加するに伴い、理論値と測定値のせん断波速度 V_s

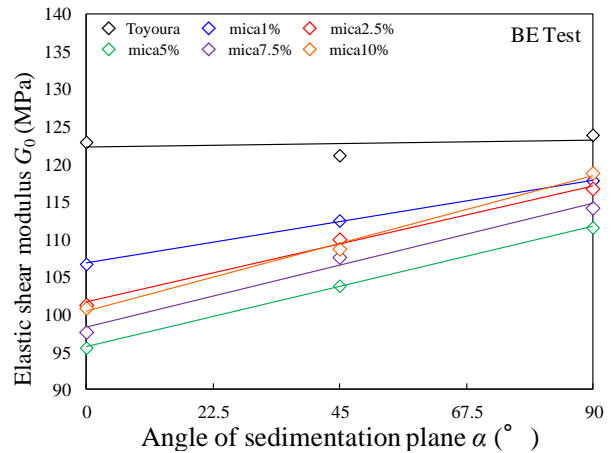


Fig.9 初期せん断弾性係数と堆積面 α の関係 (BE 試験)

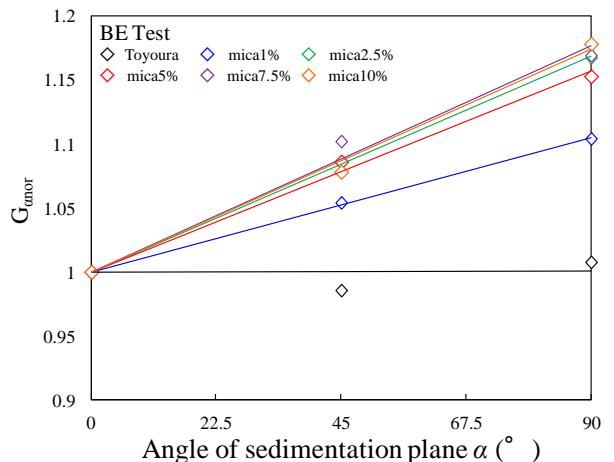


Fig.10 正規化した初期せん断弾性係数と堆積面 α の関係 (BE 試験)

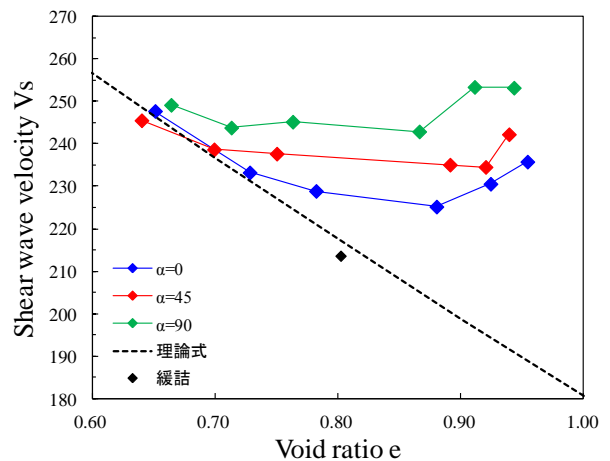


Fig.11 せん断波速度 V_s と間隙比 e の関係 (BE 試験)

との差が大きくなっていることが分かる。測定値は間隙比 e が増加してもせん断波速度 V_s は同程度かやや増加する傾向を示す。これは豊浦砂の粒子に比べ、マイカ粒子の方が、せん断波伝達速度が大きいためだと考えられる。

BE 試験でマイカ混合砂 7.5%、10% の初期せん

断弾性係数 G_0 がマイカ混合砂 5% の初期せん断弾性係数 G_0 より大きくなった原因は、マイカ混合量が比較的少ないケース (1%~5%) はマイカによるせん断波速度 V_s の増加の影響よりも間隙比 e の増加によるせん断波速度 V_s の低下の影響が大きかったため、初期せん断弾性係数 G_0 が低下したが、マイカ混合量の多いケース (5%~10%) はマイカ混合によるせん断波速度 V_s の増加の影響が支配的となったためせん断弾性係数 G_0 が増加したものだと考えられる。

4.3 LSS 試験と BE 試験の比較

同一供試体を用いているにも関わらず、LSS 試験より BE 試験の方が高い初期せん断弾性係数 G_0 を示した。Fig.12 に BE 試験の初期せん断弾性係数 G_0 と LSS 試験の初期せん断弾性係数 G_0 の差と堆積面 α の関係を示す。これより、マイカ混合量の増加に伴い、LSS 試験と BE 試験の初期せん断弾性係数 G_0 の差が大きくなっていることが分かる。これは、マイカ混合量が増加してくると、今回精度を上げた LSS 試験でも弾性域を測定できず、非線形性で小さくなったせん断弾性係数 G を測定しているためと考えられる。

Fig.13 に LSS 試験より得られた初期せん断弾性係数 G_0 と間隙比 e の関係を示す。Fig.14 に BE 試験より得られた初期せん断弾性係数 G_0 と間隙比 e の関係を示す。Fig.13 より LSS 試験より得られた初期せん断弾性係数 G_0 は理論式と相関がよい。このことより LSS 試験は荷重を供試体全体で支えるため、供試体の大部分を占める豊浦砂の間隙比の影響が支配的である。間隙比の大きい箇所では理論値とのずれが大きい理由は、上述したように、マイカの混合量が多くなると正確な弾性領域の測定ができていないためだと考えられる。一方、Fig.14 より BE 試験は理論値との相関がよくない。BE 試験は試験の特性状、せん断波の最短到達時間から初期せん断弾性係数 G_0 を算出することとなる。また、これまで述べたとおり、豊浦砂に比べマイカ粒子の方が、せん断波伝達速度が早いことがわかっている。理論線との誤差を生んだ原因は、せん断波が選択的にマイカ粒子を通過したことによると考えられる。つまり、BE 試験では局所的な初期せん断弾性係数 G_0 を測定しているこ

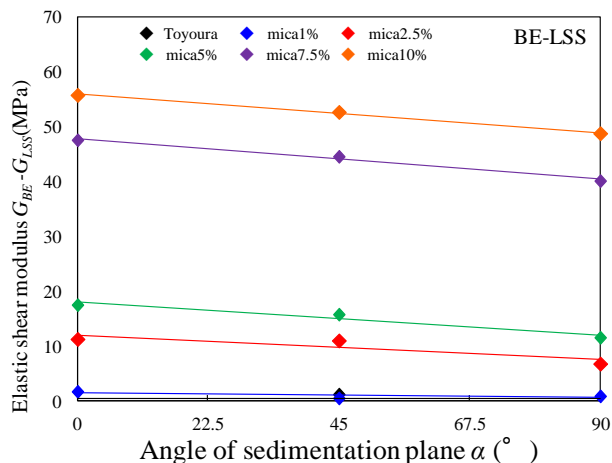


Fig.12 LSS 試験と BE 試験の結果の差異

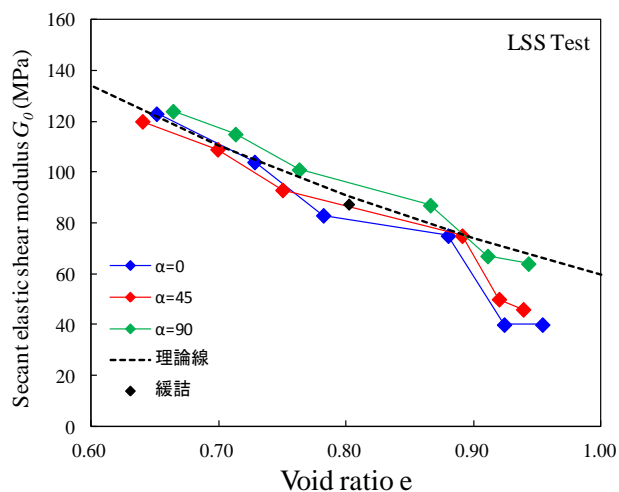


Fig.13 初期せん断弾性係数 G_0 と間隙比 e の関係 (LSS 試験)

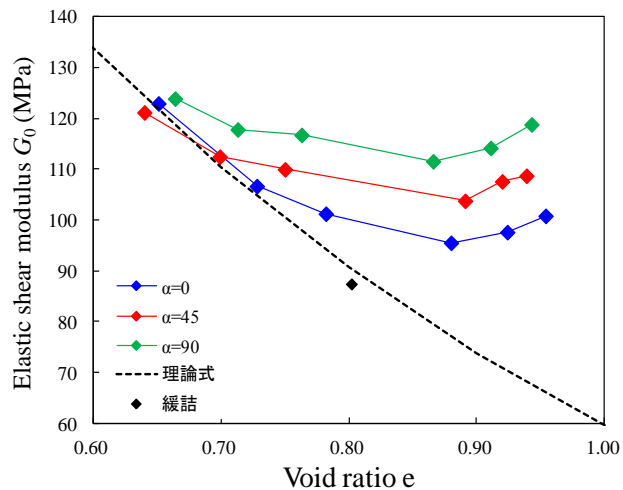


Fig.14 初期せん断弾性係数 G_0 と間隙比 e の関係 (BE 試験)

とがわかる。

5. 固有異方性が初期せん断弾性係数に与える影響のメカニズムに対する考察

豊浦砂とマイカ混入砂の堆積面の角度に対する初期せん断弾性係数の傾向が異なった理由に

ついて考察する。Fig.15 に豊浦砂のケースにおける土粒子の配向性を模式的に示す。 $\alpha=90$ 度の方がせん断波の伝播方向に土粒子の接触箇所が少ない。接触面より土粒子固体の方が波の通過速度は速いと考えられるため、接触箇所の少ない $\alpha=90$ 度の方が伝播速度は速くなり、せん断弾性係数は大きくなると考えられる。しかし、豊浦砂のケースでは、初期せん断弾性係数は堆積面の角度によらず、ほぼ一定となった。これは、豊浦砂の扁平率が小さいため、今回の供試体作製方法（振動締固め）では、 $\alpha=0$ 度と $\alpha=90$ 度で土粒子の接触箇所に大きな差が生じず、配向性の影響が現れにくかったと推測する。一方、Fig.16 にマイカ混入砂のケースにおける土粒子の配向性を模式的に示す。ここでは、簡略化のためマイカ粒子のみで描いている。前述のメカニズムにより、マイカ混入砂の場合は $\alpha=90$ 度の方が $\alpha=0$ 度よりも初期せん断弾性係数は大きくなっている。これは、土粒子の扁平率が大きい固有異方性の影響を顕著に受けたためと考えられる。

6. まとめ

本研究では、土粒子の配向性が固有異方性に与える影響について調べるために、豊浦砂とマイカを対象に堆積面の角度を変えて LSS 試験および BE 試験を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 堆積面の角度が増加するとマイカを含むケースは初期せん断弾性係数 G_0 が増加する
- 2) マイカの含有量が多いケースほど、堆積面の角度が増加することによる初期せん断弾性係数 G_0 の増加割合が大きい。
- 3) マイカ粒子が曲げ変形や破碎を起こすため、せん断開始直後からせん断弾性係数が低下する（強い非線形性を示す）
- 4) 豊浦砂よりマイカ粒子の方が、せん断波伝達速度が速いため、BE 試験ではせん断波がマイカ粒子を選択的に通過することにより、局所的な初期せん断弾性係数 G_0 を測定していることになる。一方、LSS 試験では、供試体の全体的な初期せん断弾性係数 G_0 を測定しているが、マイカ混合量が増えると、強い非線形性により弾性域の測定が難しくなる。

本研究より、固有異方性が初期せん断弾性係数

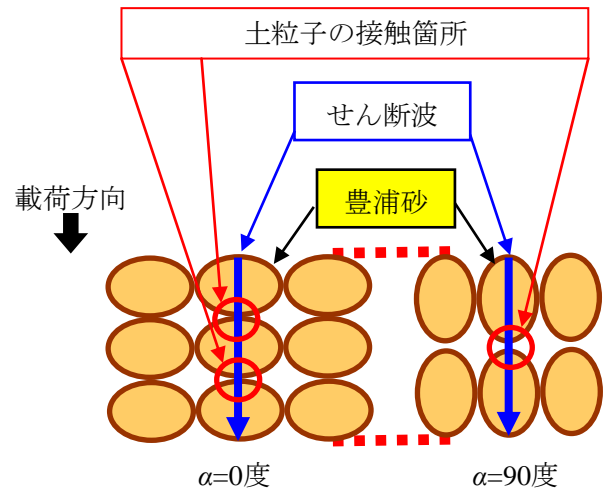


Fig.15 土粒子の配向性(豊浦砂)

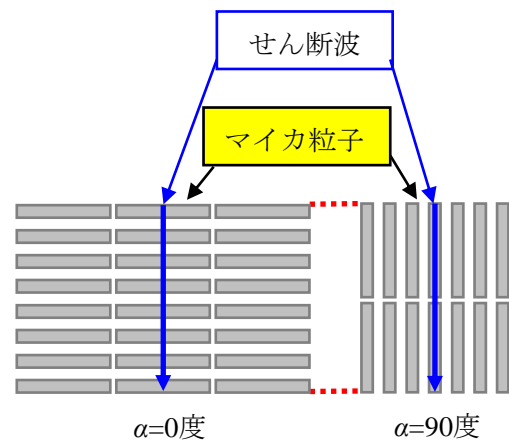


Fig.16 土粒子の配向性(マイカ混入砂)

に与える影響を確認できた。マイカ固有の特性である圧縮性、破碎性の影響も確認した。この知見より、マイカのような特殊な粒子が混合されると、BE 試験では局所的なせん断弾性係数が測定される可能性が示唆された。実務では、扁平な粒子の配向性が確認できた場合、最低でも鉛直方向と水平方向の異方性を確認するとともに（例えば、PS 検層（鉛直方向）と表面波探査（水平方向）など）、波動伝播だけでなく、全体的なせん断弾性係数 G を測定できる荷重試験（LSS 試験など）を行うことが望ましい。

【参考文献】

- 1) 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正, 村田秀一, 締固めまさ土の強度・変形特性に及ぼす異方性の影響, 土木学会論文集C, Vol62, No.2, 360-370, 2006.4
- 2) 藤川浩理, 砂の変形・強度特性に及ぼす固有異方性の影響, 長岡技術科学大学修士論文, pp.74-140, 2013.3