

マイカ混じり砂の変形・強度異方性に関する研究

地盤工学研究室 米川 幸宏
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

今後の基礎・地中構造物の設計には経済性と安全性を考慮した合理的な設計が求められている。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レベル($10^{-4}\% \sim 10^{-1}\%$)の変形係数を詳細に把握する必要がある。

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、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⁾。

そこで、本研究では扁平な土粒子であるマイカを豊浦砂に混ぜて同試験を行い、扁平な土粒子が固有異方性にどのような影響を及ぼすか調べた。なお、扁平な粒子の混入量を変えることで固有異方性の影響に変化が生じるか調べるために、マイカを豊浦砂に質量比で1, 5, 10%混ぜて試験を行った。

2. 使用した試料

本研究では、標準砂である豊浦砂と扁平な土粒子として知られ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。豊浦砂は比較的粒径が揃っており、粒子形状は少し扁平している。マイカは豊浦砂と同様の粒度であるが、薄片状の粒子形態をしているため、圧縮性、破碎性を有する土粒子である。

3. 供試体作製方法

供試体は、「乾燥振動法」で作製した。乾燥振動法はモールド内に試料を10層に分けて入れ、1層入れる毎に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る方法である。

ここで、Fig.1 に示すように堆積面が水平方向の

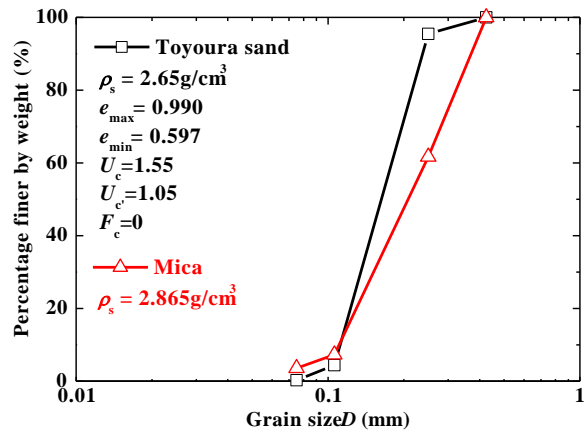


Fig.1 使用した試料の物理的性質

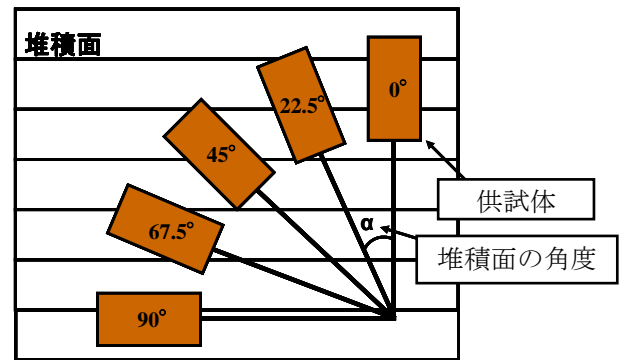


Fig.2 堆積面の定義

場合を $\alpha=0^\circ$ として定義する。その後、供試体を自立させるために、水槽内にモールドを設置し下部より一定の流速で通水し、一定の水位を保った。その後、脱水のために水槽内からモールドを取り出し一定時間放置した。トリミング法により直径50mm、高さ125mmの寸法に成形した。

4. 試験概要

4.1 LSS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、通気性のない油越しに空圧制御を行った。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 ε_a (%), および局所側方ひずみ ε_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.

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

4.2 BE 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. ここで得られる値を初期せん断弾性係数 G_0 と仮定した.

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

5. 試験条件

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 で载荷し, 有効拘束圧 150kPa まで载荷させ, 等方圧密を行った. その後排水条件でせん断を行った.

6. 試験結果

6.1 豊浦砂を対象にしたケースの結果

6.1.1 排水強度

軸差応力 q -軸ひずみ ε_a 関係を Fig.3 に示す. 軸ひずみ 0.8% 付近より堆積面の角度によって顕著に勾配が変化している. 堆積面の角度が大きいくほど, 軸ひずみ約 0.8~2% の勾配が小さくなる. また, 排水強度 q_{max} (最大軸差応力)を堆積面の角度 α 別にまとめたグラフを Fig.4 に示す. 堆積面の角度が大きくなるほど, 排水強度 q_{max} は低くなる傾向を示した.

6.1.2 割線せん断弾性係数

割線せん断弾性係数 G -せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.5 に示す. 堆積面の角度によらず, 局所ひずみ 0.002~0.003% 程度まで割線せん断弾性係数は一定である. その後のせん断弾性係数の挙動に堆積面

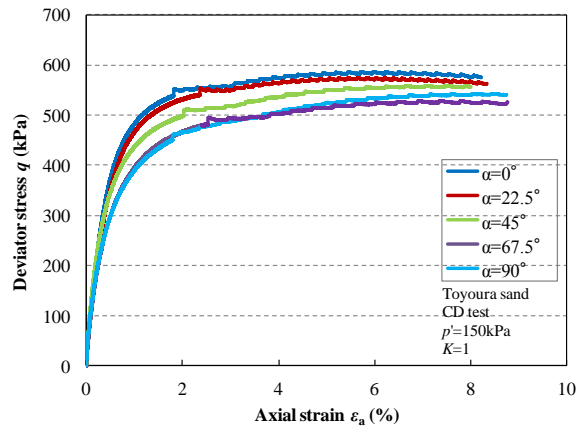


Fig.3 軸差応力 q -軸ひずみ ε_a 関係

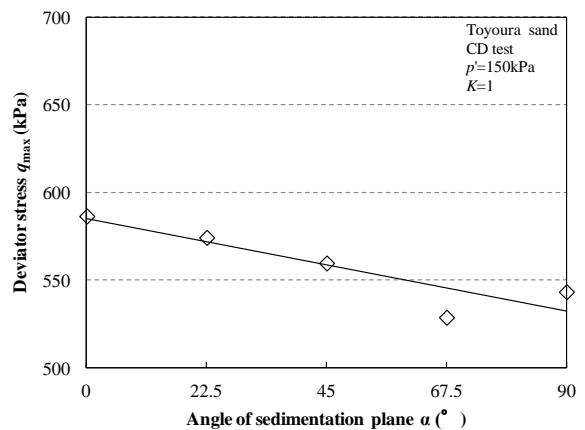


Fig.4 排水強度 q_{max} -堆積面の角度 α 関係

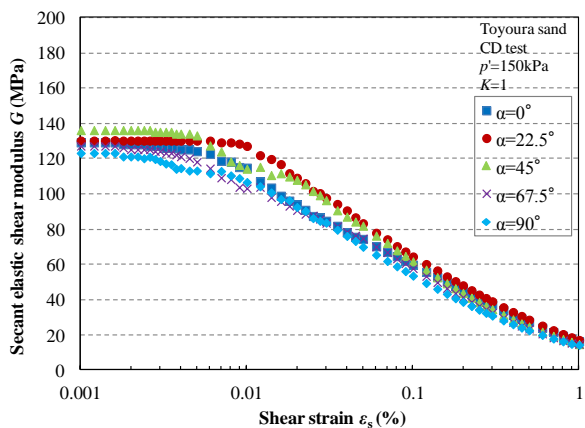


Fig.5 割線せん断弾性係数 G -せん断ひずみ ε_s 関係

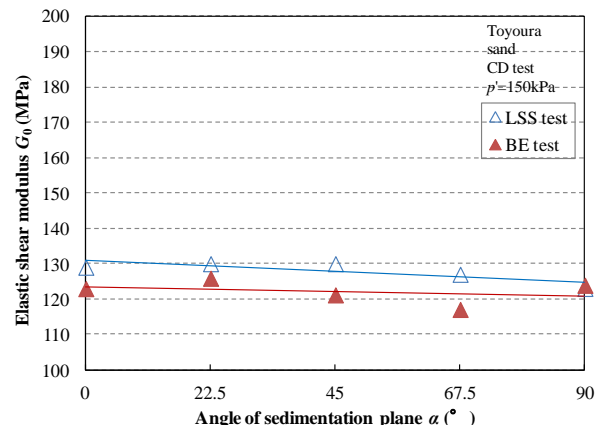


Fig.6 初期せん断弾性係数の比較

の角度による相関性は見られなかった。

また、LSS 試験と BE 試験から求められる初期せん断弾性係数 G_0 の結果を堆積面の角度別にまとめたグラフを Fig.6 に示す。ここで、LSS 試験の結果はせん断ひずみ 0.001% 時の割線せん断弾性係数である。両試験結果とも、初期せん断弾性係数 G_0 は切り出し角によらず、ほぼ横ばいとなった。

6.2 マイカ混入砂の結果

6.2.1 排水強度

マイカを豊浦砂に質量比 10% 混入したケースの軸差応力 q -軸ひずみ ε_a 関係を Fig.7 に示す。豊浦砂の結果とは異なり、軸ひずみ 15% を越えても軸差応力が一定となることはなかった。また、堆積面の角度によらず、ほぼ同様の勾配で軸差応力は増加しており、大きな強度差は見られなかった。Fig.8 に体積ひずみ ε_v -軸ひずみ ε_a 関係を示す。なお、体積ひずみは圧縮側をプラス、膨張側をマイナスとしている。マイカを 10% 混入した豊浦砂では、軸ひずみが大きくなるにつれて圧縮しているが、豊浦砂のみでは、膨張しているのが分かる。この違いより、せん断中にマイカ粒子が破碎して土粒子の配向性がなくなり、強度差がなくなったものと推測する。

6.2.2 せん断弾性係数

マイカ混入率 10% の割線せん断弾性係数 G -せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.9 に示す。豊浦砂を対象にしたケース(Fig. 5)とは異なり、全ての切り出し角でせん断ひずみ 0.0005% からすでに割線せん断弾性係数は減少傾向となった。これは、微小ひずみ領域でマイカ粒子の破碎の影響を受けているためと考えられる。

また、LSS 試験と BE 試験から求められる初期せん断弾性係数 G_0 の結果を堆積面の角度別にまとめたグラフを Fig.10 に示す。ここで、LSS 試験の結果はせん断ひずみ 0.001% 時の割線せん断弾性係数である。両試験結果とも堆積面の角度が大きくなるにつれて初期せん断弾性係数は増加する傾向を示した。

マイカ混入率 5%, 1% の LSS 試験と BE 試験から求められる初期せん断弾性係数 G_0 の結果を堆積面の角度別にまとめたグラフを Fig.11, Fig.12 に示す。マイカ混入率 5%, 1% においてもマイカ混入率 10% と同様の挙動を示した。これより、微小ひずみ領域のせん断挙動は、マイカ粒子の配向性に支配されると推測する。

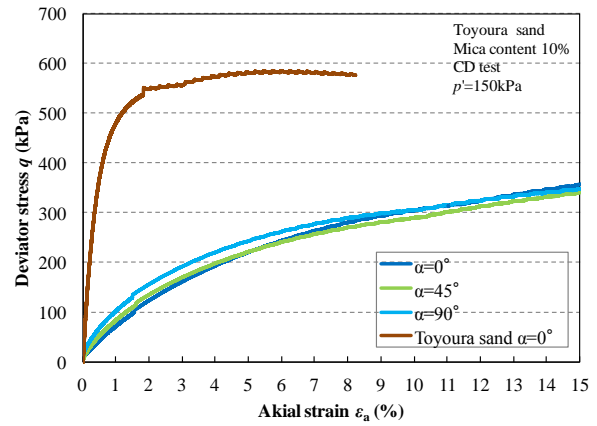


Fig.7 軸差応力 q -軸ひずみ ε_a 関係

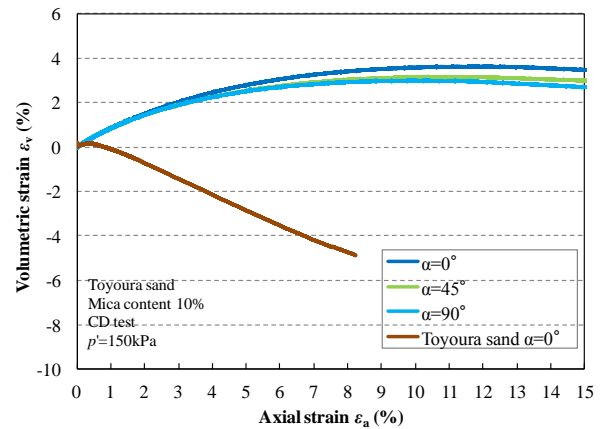


Fig.8 体積ひずみ ε_v -軸ひずみ ε_a 関係

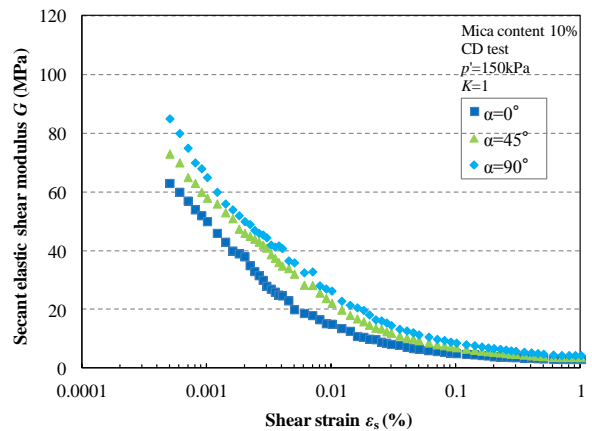


Fig.9 割線せん断弾性係数 G -せん断ひずみ ε_s 関係

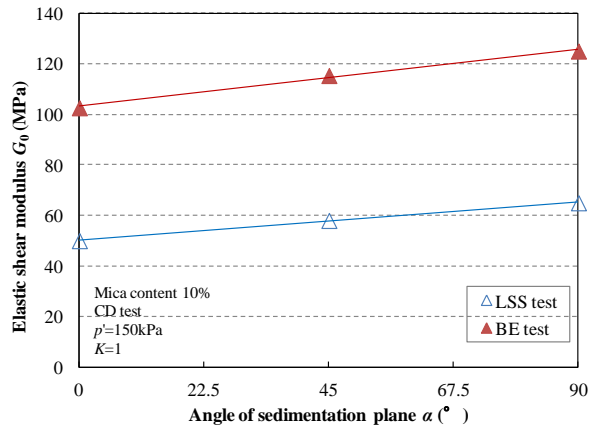


Fig.10 初期せん断弾性係数の比較 (マイカ 10%)

なお、LSS 試験と BE 試験の結果に差が生じているが、これについて説明する。 $\alpha=0$ 度における、マイカ混入率別の割線せん断弾性係数-せん断ひずみ ($G-\varepsilon_s$) 関係を Fig.13 示す。図の左上の横線は各マイカ混入率の BE 試験の結果を示したものである。一般的に土は 0.001% 以下のひずみで弾性体と見なすことが多く、Fig.13 より、豊浦砂においてはせん断ひずみ 0.002% 以下で割線せん断弾性係数は一定の値を示していることがわかる。しかし、マイカ混入砂においては、せん断ひずみ 0.001% ですでに割線せん断弾性係数は右肩下がりの傾向を示し、その傾きはマイカ混入率が大きくなるほど大きい。これは、マイカ粒子の破碎によるものと考えられる。計測限界であるせん断ひずみ 0.0005% から 0.001% にかけて割線せん断弾性係数が減少していることから、ひずみ 0.0005% 以下では、ひずみがゼロに近づくにつれて割線せん断弾性係数は増加すると推測される。BE 試験の結果はひずみレベルがわからないが、限りなくひずみがゼロに近いときの値である。そのため、LSS 試験の結果はせん断ひずみがゼロに近づくほど BE 試験の結果に近づくと推測される。

BE 試験より求められた初期せん断弾性係数を $\alpha=0$ 度を基準として正規化したものを Fig.14 に示す。マイカ混入率が大きくなるほど、堆積面の角度の増加に対する初期せん断弾性係数の増加量は多くなった。これより、マイカ混入率が大きくなるほど固有異方性の影響を受けることがわかった。

7. 異方性を与える土粒子のメカニズム

7.1 強度異方性

Fig.4 で強度差が生じた要因について土粒子の配向性の面から考察する。Fig.15 に豊浦砂のケースの土粒子の配向性を示す。 $\alpha=0$ 度は堆積面と同方向に土粒子の長軸方向がきており、 $\alpha=90$ 度はその反対で堆積面と直角方向に土粒子の長軸方向がきていると考えられる。これより、 $\alpha=0$ 度の方が $\alpha=90$ 度に比べて土粒子の変形に対する安定度が高くなると推測される。そのため、堆積面の角度が大きくなるほど、排水強度 q_{max} は低くなる傾向を示したと考えられる。

また、マイカを 10% 豊浦砂に混入したところ、大きな強度差が生じなかった要因は圧縮性にあると 6.2.1 では考察しているが、ここでは、土粒子の配向性の微視的観点から考察する。Fig.16 にせん断中の土粒子のメカニズムを示す。大きな強度差が生じなかった要因としては、軸ひずみが大

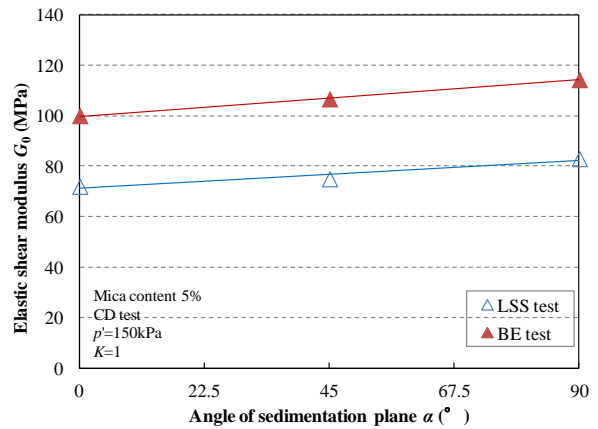


Fig.11 初期せん断弾性係数の比較 (マイカ 5%)

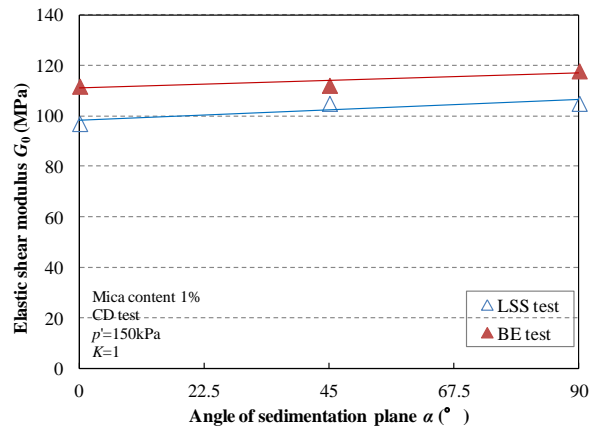


Fig.12 初期せん断弾性係数の比較 (マイカ 1%)

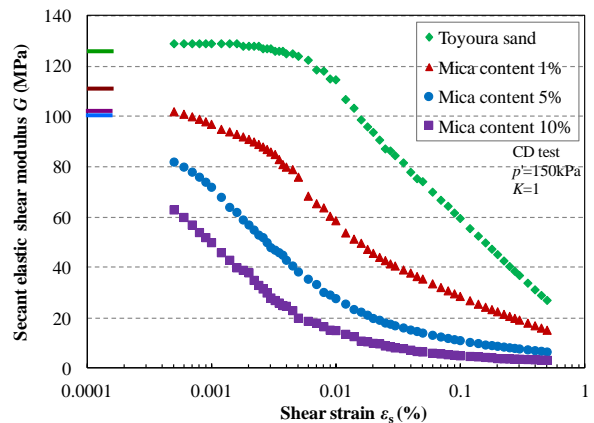


Fig.13 マイカ混入率別の $G-\varepsilon_s$ 関係 ($\alpha=0$ 度)

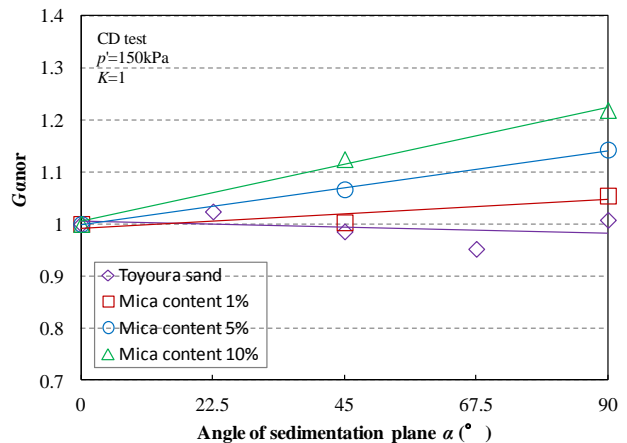


Fig.14 マイカ混入率別の Ganor- α 関係 (BE 試験)

きくなるにつれてマイカ粒子が破碎する影響が大きく、土粒子の配向性の影響が現れなくなったことが考えられる。

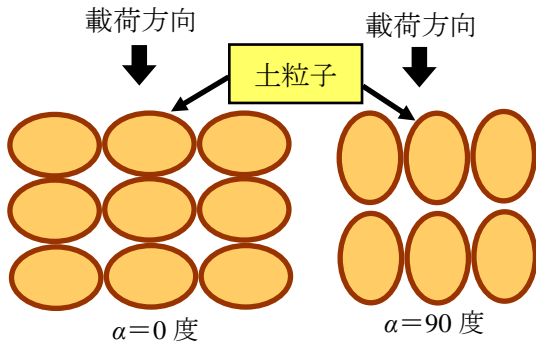


Fig.15 土粒子の配向性

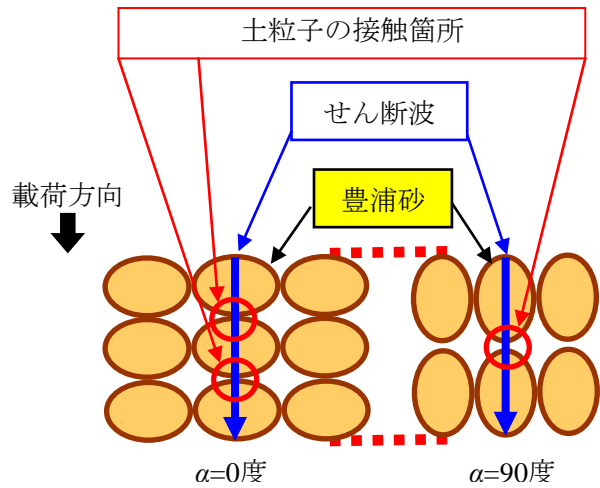


Fig.17 土粒子の配向性(豊浦砂)

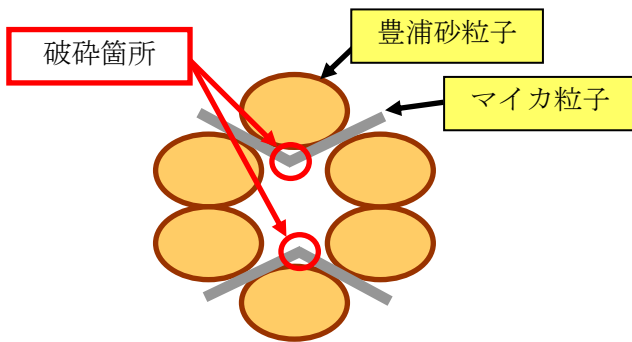


Fig.16 せん断中の土粒子の配向性

7.1.1 固有異方性が初期せん断弾性係数に与える影響

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.17 に豊浦砂のケースの土粒子の配向性を示す。 $\alpha=90$ 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、ほぼ横ばいとなった。これは、豊浦砂の扁平率が小さいため、 $\alpha=0$ 度と $\alpha=90$ 度で土粒子の接触箇所に大きな差が生じず、配向性の影響を受けづらかったためと推測する。一方、 Fig.18 にマイカ混入砂のケースの土粒子の配向性を示す。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。

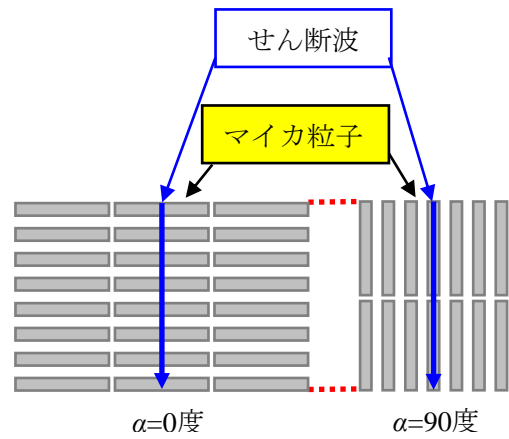


Fig.18 土粒子の配向性(マイカ混入砂)

8. 結論

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) 豊浦砂では、 $10^{-3}\%$ ひずみレベルまで線形弾性挙動を示すが、マイカが混入されると線形弾性的な挙動を示すのは、さらに小さなひずみレベルとなり、土は $10^{-3}\%$ ひずみまでは弾性的な挙動を示すという既往の知見が当てはまらない。
- (2) 土粒子の扁平率が大きいと、微小ひずみレベルのせん断弾性係数 G は固有異方性の影響を受け、 $\alpha=0$ 度で最も小さく、 $\alpha=90$ 度で最も大きい。
- (3) 扁平な土粒子を多く含むほど、せん断弾性係数 G に対する固有異方性の影響が大きくなる。
- (4) マイカを含む試料では、排水強度に関して、

固有異方性の影響を確認できなかった。これは、せん断中にマイカ粒子が破碎して、異方性がなくなる可能性が考えられる。

- (5) 以上の結果より、一般的には、堆積面の角度の増加に対して、強度と初期せん断弾性係数は逆の傾向を示す、ことがわかる。

【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