

# 砂の変形・強度特性に及ぼす固有異方性の影響

地盤工学研究室 藤川 浩理  
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・施工では経済性と安全性を考慮した合理的な設計が求められており、そのためには地震応答解析等を使用する微小ひずみレベル( $10^{-6} \sim 10^{-3}$ )の変形係数を詳細に把握する必要がある。また、実地盤の土粒子構造は、その構造物の建設過程や応力履歴に起因して異方的であることがほとんどである<sup>1)</sup>。この異方性には堆積時の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。

筆者らのこれまでの研究では、微小ひずみレベルでの誘導異方性が変形係数に与える影響について調べるために、異方圧密された粘性土、砂質土の局所微小ひずみ測定試験、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）を同時に行い、両者から得られた変形係数の比較より、微小ひずみレベルでの変形係数測定手法の妥当性について検討した<sup>2)</sup>。

そこで、本研究では、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LSS試験およびBE試験を実施した。さらに供試体作製方法を変えたり、配向性を強くすると考えられる扁平な形状をした土粒子(マイカ)を使用したりして、土粒子の配向性と固有異方性の関係について様々な視点から検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

## 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り、また、薄片状の粒子形態や圧縮性、破碎性を有する土粒子である。

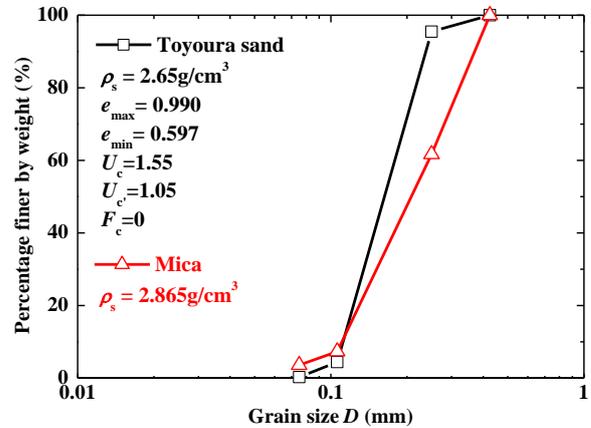


Fig.1 使用した試料の物理的性質

## 3. 供試体作製方法

供試体作製方法は、土粒子の配向性の影響を確認するために「ふるい落下法で作製したケース」と「土粒子の配向性を乱して作製したケース」の2ケースを行った。また、土粒子の配向性を強くした影響を確認するために使用したマイカは非常に扁平であり空中に舞ってしまうため、「乾燥振動法」を用いて供試体を作製した。なお、マイカを対象にしたケースは豊浦砂に質量比で10%のマイカを混入して供試体を作製した。

ふるい落下法による作製方法はモールド内に一定の高さより自然落下、堆積させる方法である。また、ふるいの落下高さは供試体採取領域(約12.5cm)の相対密度  $D_r \pm 1\%$  となる範囲を事前に予備試験として求め、供試体の相対密度を均一とした。

土粒子の配向性を乱した作製方法は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、細い金属棒で突いて作製する方法である。

乾燥振動法は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る方法である。

ここで、Fig.2 に示すように堆積面が水平方向の

場合を  $\alpha=0^\circ$  として定義する。その後、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。これにより土粒子間にサクションが働き、供試体の自立を可能にした。トリミング法により直径 50mm、高さ 125mm の寸法に成形した。相対密度  $D_r$  は、ふるい落下法より作製したケースが  $D_r \approx 90\%$ 、配向性を乱して作製したケースが  $D_r \approx 75\%$  となった。

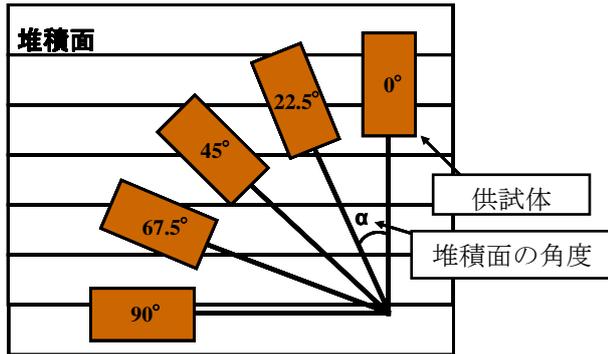


Fig.2 堆積面の定義

### 3. 試験概要

#### 3.1 LSS 試験

試験ではセル水に含まれる溶存空気が供試体に浸入すること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  $\varepsilon_a(\%)$ 、および局所側方ひずみ  $\varepsilon_r(\%)$  を直接測定し、軸差応力等との関係から Eq.(1) を用いて各種変形係数を求めた。ここで、 $\varepsilon$  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)、 $\sigma'_a$  は有効鉛直応力(kPa)、 $\sigma'_r$  は有効側方応力(kPa)、 $E$  は割線ヤング率(MPa)、 $\nu$  はポアソン比、 $G$  は割線せん断弾性係数(MPa) である。

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

#### 3.2 BE 試験

三軸試験機の供試体上下に取り付けるキャップおよびペDESTAL 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せん断波速度  $V_s$  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 1 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  $\Delta t$  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  $\rho_t$  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。

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

### 4. 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 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、軸ひずみ 1% 程度までせん断速度 0.0025%/min、その後せん断速度 0.025%/min で軸ひずみ 8% (マイカは軸ひずみ 15%) までせん断を行った。

### 5. 試験結果

#### 5.1 豊浦砂を対象にしたケースの結果

##### 5.1.1 供試体条件の比較

ふるい落下法、土粒子の配向性を乱して作製したケースの相対密度  $D_r$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係を Fig.3 に示す。ふるい落下法より作製したケースの方が密詰めとなるのが分かる。また、堆積面の角度の大小関係による相対密度  $D_r$  の変化はほとんど見られなかった。

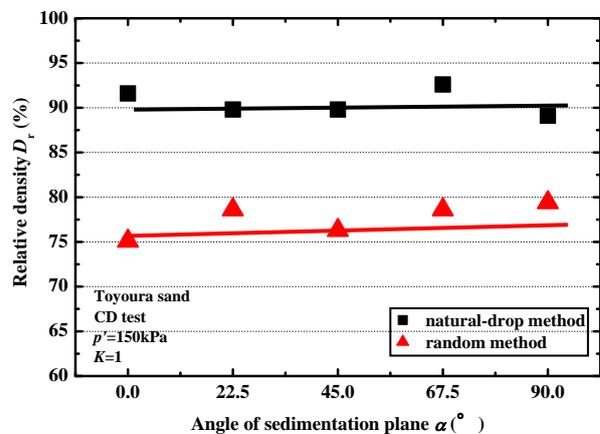


Fig.3 相対密度  $D_r$ -堆積方向の角度  $\alpha$  関係

## 5.1.2 堆積方法の違いが強度に与える影響

### (a) ふるい落下法で作製したケース

ふるい落下法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.4 に示す。軸ひずみ 0.6% 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ほど、軸ひずみ約 0.6~2% の勾配が小さくなり、排水強度  $q_{\max}$  (最大軸差応力) で大きな強度差をもたらしている。

### (b) 土粒子の配向性を乱して作製したケース

土粒子の配向性を乱して作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.5 に示す。軸ひずみが大きくなるにつれて、堆積面の角度によらず、同じ挙動で軸差応力が大きくなっている。これにより、排水強度  $q_{\max}$  (軸ひずみ 7% 時の軸差応力) もほぼ横ばいという結果となった。

### (c) 排水強度 $q_{\max}$ の比較

ふるい落下法で作製したケース (natural method) と土粒子の配向性を乱して作製したケース (random method) の排水強度  $q_{\max}$  を堆積面の角度  $\alpha$  別にまとめたグラフを Fig.6 に示す。ふるい落下法で作製したケースでは堆積面の角度が大きくなるにつれて、著しい強度低下が見られるのに対し、土粒子の配向性を乱して作製したケースではほぼ横ばいで大きな強度差は見られなかった。これより、土粒子の配向性と強度異方性には関連性があると推測できる。また、一般的に密度と強度には関連性があると言われているが、Fig.3 の相対密度と堆積面の角度関係を照らし合わせると、強度は密度のみではなく、固有異方性にも大きく依存していることが分かる。

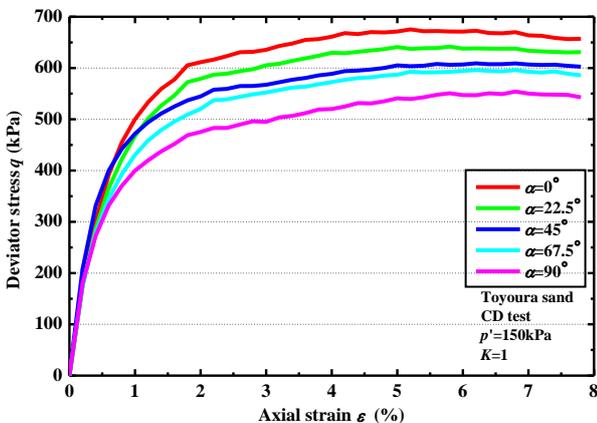


Fig.4 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係(ふるい落下法)

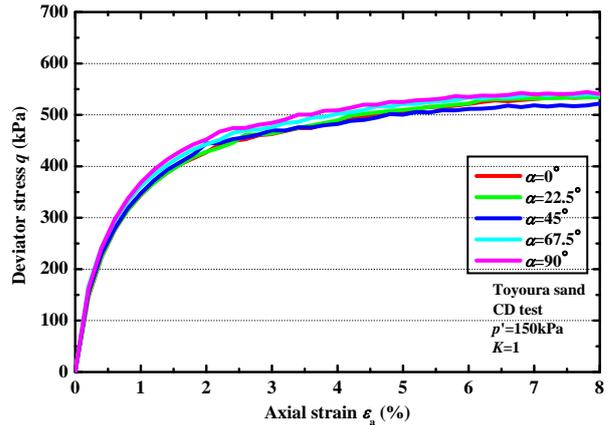


Fig.5 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係  
(配向性を乱して作製した方法)

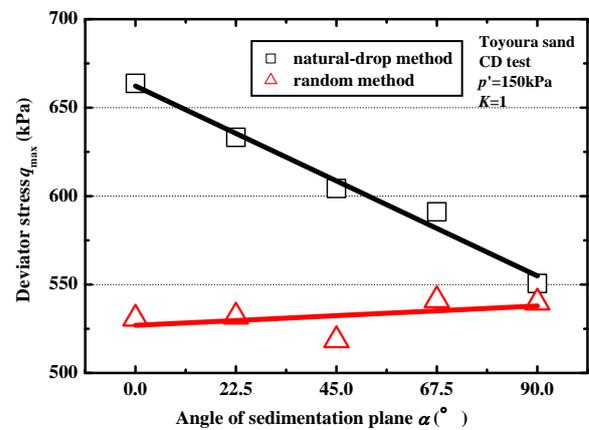


Fig.6 排水強度  $q_{\max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係

## 5.1.3 堆積方法の違いがせん断弾性係数に与える影響

### 5.1.3.1 LSS 試験結果

#### (a) ふるい落下法で作製したケース

ふるい落下法で作製したケースのせん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.7 に示す。微小ひずみ領域のせん断弾性係数は堆積面の角度が大きくなるにつれて、やや大きくなる傾向が見られる。詳細は、(c)にて検討する。また、局所ひずみ 0.002~0.003% 程度までは、せん断弾性係数は一定値を保持している。ひずみ 0.1% 付近より堆積面の角度によらず、一定の勾配でせん断弾性係数が低下しているのが読み取れる。

#### (b) 土粒子の配向性を乱して作製したケース

土粒子の配向性を乱して作製したケースのせん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.8 に示す。微小ひずみ領域のせん断弾性係数は堆積面の角度によらず、ほぼ同一の値を示す。また、局所

ひずみ 0.002~0.003%程度までは、堆積面の角度によらず、ふるい落下法同様に、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は堆積面の角度によらず同勾配で低下していることが読み取れる。

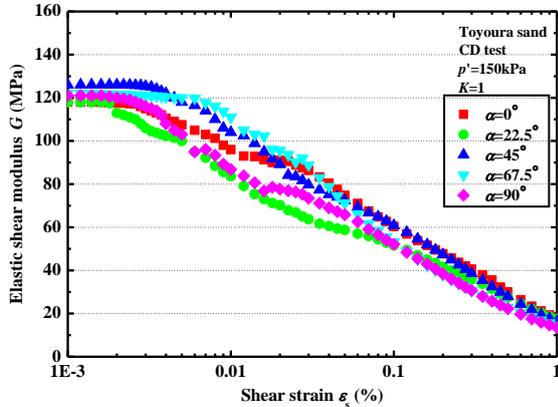


Fig.7 せん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係  
(ふるい落下法)

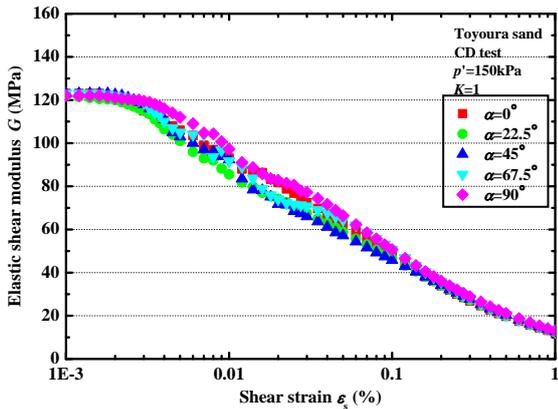


Fig.8 せん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係  
(配向性を乱して作製した方法)

### (c) 初期せん断弾性係数の比較

LSS 試験により求められたふるい落下法で作製したケースと配向性を乱して作製したケースの初期せん断弾性係数  $G_0$ -堆積面の角度  $\alpha$  別にまとめたグラフを Fig.9 に示す。初期せん断弾性係数  $G_0$  はせん断ひずみ 0.001%時のせん断弾性係数と定義する。ふるい落下法で作製したケースは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  $G_0$  がやや増加傾向にあることが分かる。それに比べて、配向性を乱して作製したケースの初期せん断弾性係数  $G_0$  は堆積面の角度の大小関係によらず、ほぼ横ばいである。これらのことから、土粒子の配向性が初期せん断弾性係数  $G_0$  に影響

を与えていることが推測できる。また、Fig.6 の強度特性の結果と比較すると、ふるい落下法に関しては、逆の傾向を示していることが分かる。

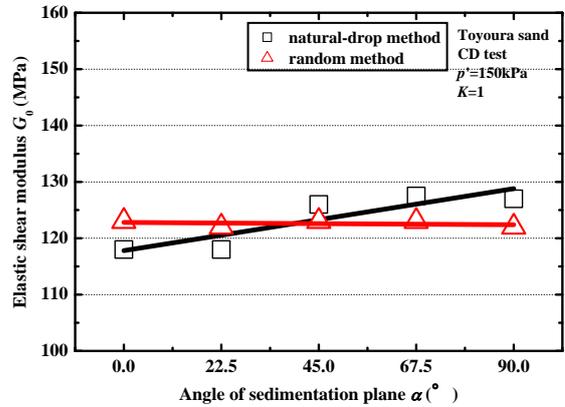


Fig.9 供試体作製方法別の初期せん断弾性係数の比較  
(LSS 試験結果)

### 5.1.3.2 BE 試験結果

ふるい落下法で作製したケースと配向性を乱して作製したケースにおいて、BE 試験により求められた初期せん断弾性係数  $G_0$ -堆積面の角度  $\alpha$  の関係を Fig.10 に示す。ふるい落下法で作製したケースでは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やや増加傾向にある。この増加勾配は LSS 試験とほぼ同様の値であった。一方で、配向性を乱して作製したケースは、LSS 試験同様、堆積面の角度の大小関係にかかわらず、ほぼ横ばいであった。供試体の作製方法にかかわらず、LSS 試験と BE 試験から求められる初期せん断弾性係数の傾向は同じであったが、その値は、配向性を乱して作製したケースにおいてやや異なった。

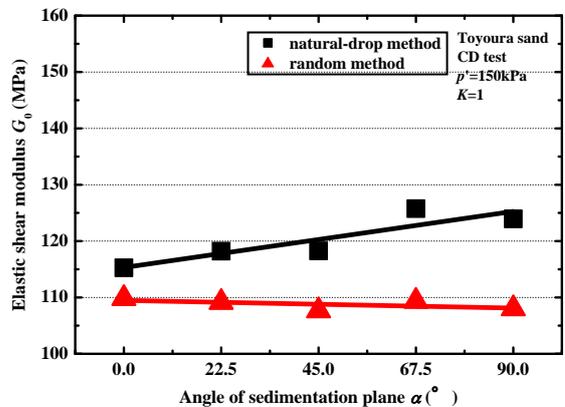


Fig.10 供試体作製方法別の初期せん断弾性係数の比較  
(BE 試験結果)

## 5.2 マイカを対象にしたケースの結果

### 5.2.1 土粒子の配向性が強度に与える影響

マイカ 10%を豊浦砂に混入した試料を乾燥振動法より供試体を作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.11 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. また, マイカを 10% 混入した豊浦砂と豊浦砂をふるい落下法より作製したケースのせん断直前の間隙比を比較すると, マイカを 10%混入した豊浦砂は非常に大きな値を示していることが分かる. マイカによって大きな間隙が生じたものと推測する.

Fig.12 に体積ひずみ  $\varepsilon_v$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  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.

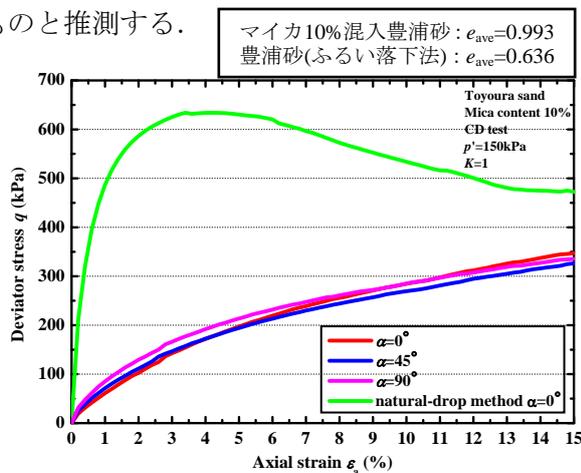


Fig.11 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係

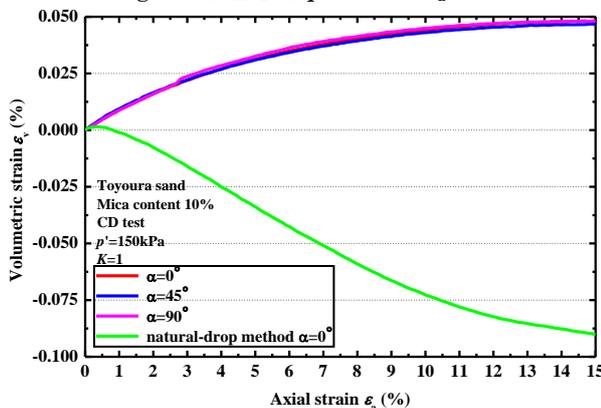


Fig.12 体積ひずみ  $\varepsilon_v$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係

### 5.2.2 土粒子の配向性がせん断弾性係数に与える影響

#### 5.2.2.1 LSS 試験結果

マイカ 10%を豊浦砂に混入した試料を乾燥振動法により供試体を作製したケースのせん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.13 に示す. 堆積面の角度が大きくなるにつれて, 微小ひずみ領域のせん断弾性係数は大きくなる. せん断ひずみ 0.002%付近より急激なせん断弾性係数の減少が見られ, せん断ひずみ 1%に近づくにつれて一定値に収束する. 豊浦砂のみの結果 (Fig. 7, 8) と比較すると, せん断弾性係数の減少傾向が大きく異なった.

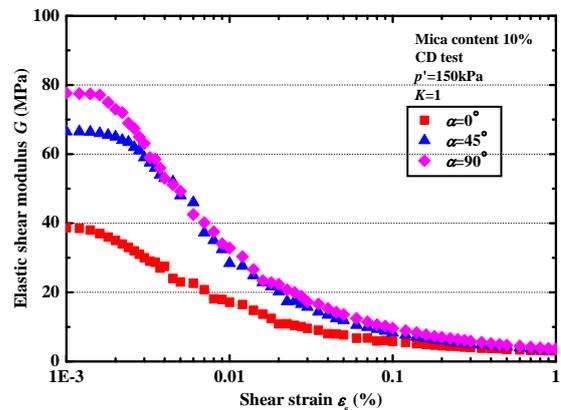


Fig.13 せん断弾性係数  $G$ -せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係

#### 5.2.2.2 LSS 試験と BE 試験の結果

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.14 に示す. 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傾向にある. LSS 試験で約 2 倍, BE 試験で 1.25 倍の増加が見られ, 豊浦砂のみ結果と比較すると増加傾向の大きさが顕著だと分かる. 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.

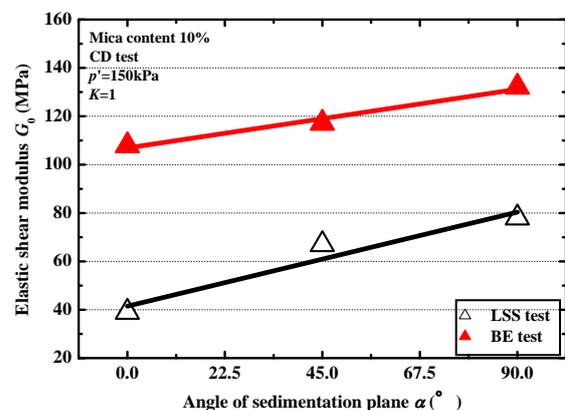


Fig.14 初期せん断弾性係数の比較

## 6. 異方性を与える土粒子のメカニズム

### 6.1 豊浦砂を対象にしたケースの結果

#### 6.1.1 強度異方性

Fig.6 の堆積方法の違いによって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した。Fig.15 にふるい落下法によって作製した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。一方で、土粒子の配向性を乱して作製したケースはFig.16のような土粒子メカニズムとなり、配向性を有さないため、強度異方性を発現しない土粒子の並びと推測する。

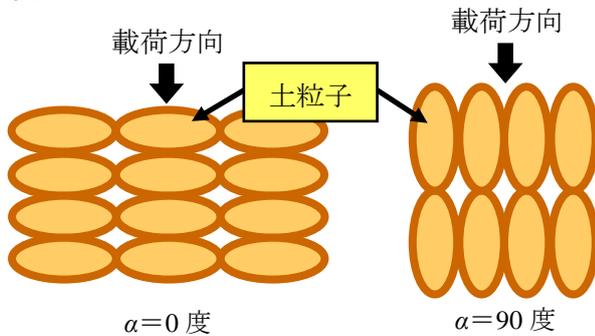


Fig.15 土粒子の配向性(ふるい落下法)

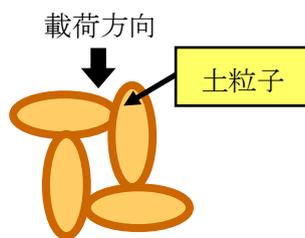


Fig.16 土粒子の配向性(配向性を乱して作製した方法)

#### 6.1.2 固有異方性が初期せん断弾性係数に与える影響

Fig.10 に示すように、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がやや増加傾向にあるメカニズムについて考察する。Fig.17 に微小ひずみ領域の各供試体状態における土粒子の配向性を示す。ふるい落下法で比較すると、 $\alpha=90$  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る。

土粒子の配向性を乱して作製した方法では土粒子の接触箇所の数は堆積面の角度を変えても、ほとんど変わらないためせん断波速度はほぼ横ばいとなった。これにより、Fig.10 のような結果となったと推測する。

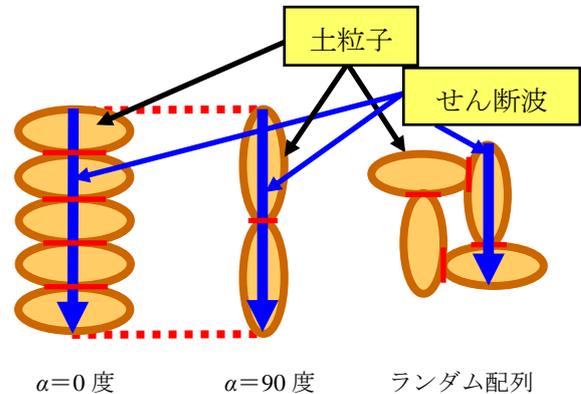


Fig.17 土粒子の配向性(微小ひずみ領域)

## 6.2 マイカを対象にしたケースの結果

### 6.2.1 土粒子の配向性が強度に与える影響

Fig.11 のようにマイカを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について圧縮性にあると5.2.1 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.18 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。

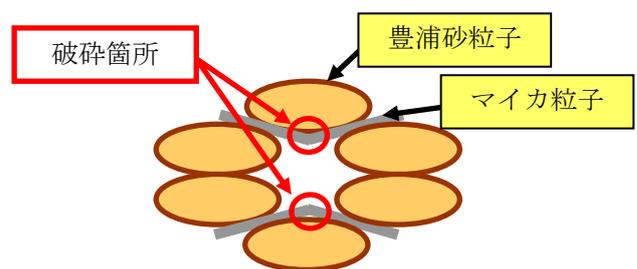


Fig.18 せん断中の土粒子の配向性

## 6.2.2 土粒子の配向性が初期せん断弾性係数に与える影響

Fig.14 のように初期せん断弾性係数が堆積面の角度が大きくなるにつれて増加傾向にある要因についても土粒子の配向性の微視的観点から考察した。Fig.19 に微小ひずみ領域の土粒子の配向性について示す。簡略化のためマイカ粒子のみで描いているが、せん断波速度が大きくなった要因は Fig.17 の豊浦砂と同様のメカニズムであり、土粒子の扁平率が大きくなったため固有異方性の影響を顕著に受けたものと推測する。

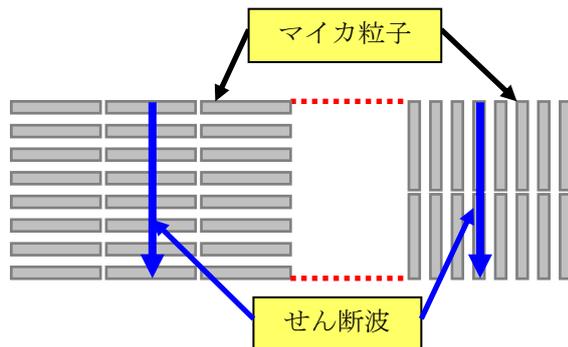


Fig.19 土粒子の配向性(微小ひずみ領域)

## 7. 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) 排水強度  $q_{max}$  に着目すると、ふるい落下法で作製したケースでは、水平方向から堆積方向の角度が大きくなるにつれて、著しい強度低下が確認できたが、配向性を乱して作製したケースでは、堆積方向の角度によらず強度はほぼ一定であった。このことから、強度特性と土粒子の配向性には密接な関係がある。
- 2) 初期せん断弾性係数  $G_0$  に着目すると、ふるい落下法で作製したケースでは堆積方向の角度が大きくなるにつれて、初期せん断弾性係数  $G_0$  はやや増加する。配向性を乱して作製したケースでは堆積方向の角度によらず強度はほぼ一定であった。このことから、微小ひずみレベルの変形係数と土粒子の配向性にも密接な関係がある。
- 3) 配向性を有した状態で堆積方向の角度が大きく

なると、排水強度  $q_{max}$  は減少し、初期せん断弾性係数  $G_0$  は、逆に増加する傾向を示す。

- 4) マイカを含む試料では、微小ひずみレベルの変形係数は、扁平率が大きい試料のため、固有異方性の影響を強く受けるが、強度に関しては、固有異方性の影響はほとんど見られなかった。これは、せん断中にマイカの粒子が破碎して、異方性が無くなる可能性が考えられる。

## 【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.
- 2) 登坂直城, 飽和砂の変形係数に与える影響, 長岡技術科学大学修士論文, pp.59-146, 2011.
- 3) 山下聡, 喜多川俊介, 堀智仁, 鈴木輝之, 堆積構造と応力の異方性が砂質土の初期せん断剛性に及ぼす影響, 土木学会論文集, pp.319-329, 2001