

単調載荷と繰返し載荷を組み合わせた微小変形特性の計測法について

地盤工学研究室 福田 圭
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。砂の粒子形状によっては、実地盤にも大きな異方性が発生することがある。合理的な設計を行うためには地震応答解析等で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、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。

既往研究では、単調載荷のみでせん断を行っていた。機械ノイズを低減する電圧増幅器等を導入したが、応力とひずみのゼロ点補正などの方法に関しての信頼性は不明確であった。そこで本研究は、繰返し載荷試験によりゼロ点補正を必要としない微小域の変形係数を算出し、単調載荷によるせん断試験を組み合わせることにより、正確な変形係数の算出を試みる。また、昨年度行った単調載荷のみの成果と比較し、計測法の妥当性を検討する。

2. 使用材料

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る。試験を行なったケースは、豊浦砂に質量比で 1, 5, 10%のマイカを混入させたものと、豊浦砂のみの計 4 ケースについて試験を行なった。

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(一定時間、負圧により脱水)、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 で等方圧密し、BE 試験を行った。次に Table.1 に示す条件で微小繰返し載荷試験を実施後、単調載荷による LSS (局所微小ひずみ) 試験を行なった。

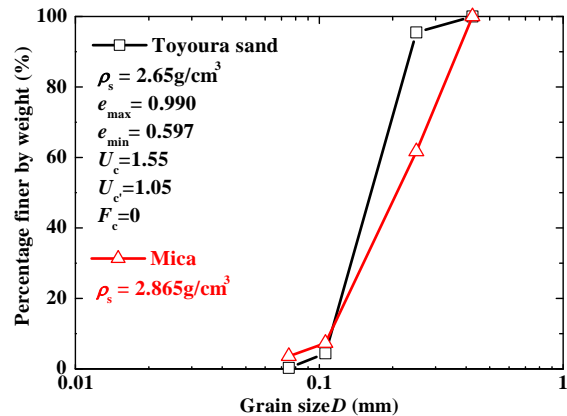


Fig.1 使用した土質材料の物理的性質

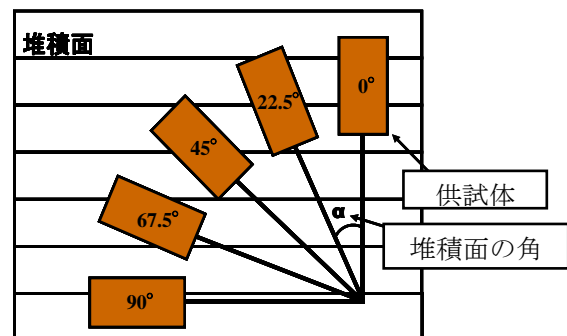


Fig.2 堆積面の定義

Table.1 微小繰返し載荷条件

	繰返し ひずみ (%)	せん断 速度 (mm/min)
Stage1	0.0002	0.0025
Stage2	0.0005	0.0025
Stage3	0.001	0.005

3.1.1 LSS 試験 (単調載荷試験)

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 $\varepsilon_a(\%)$, 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 は鉛直有効応力(kPa), σ'_r は側方有効応力(kPa), E は割線ヤング率(MPa), ν はポアソン比, G はせん断弾性係数(MPa)である. $q = \sigma'_a - \sigma'_r$, $E = \frac{q}{\varepsilon_a}$, $\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$, $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ (1)

3.1.2 LSS 試験 (繰返し载荷試験)

各段階ともに微小繰返し载荷を 11 回行い, 1 波分のデータに分割する. Fig.3 に 1 波分の軸差応力とせん断ひずみの関係を示す. G はそのデータを縦軸に軸差応力 $q/2$ (kPa), 横軸にせん断ひずみ $\gamma(\%)$ をプロットし, 最大値と最小値の傾き (Eq.(2)) から, 算出する.

$$G = \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \cdot \cdot (2)$$

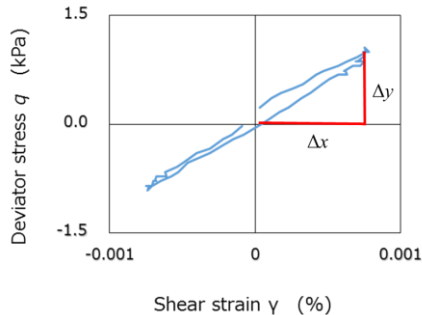


Fig.3 軸差応力とせん断ひずみの関係 (1 波分)

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ダスタルに 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.(3)), 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.

$$V_s = \frac{L}{\Delta t}, \quad G = \rho_t V_s^2 \cdot \cdot \cdot (3)$$

4. 実験結果と考察

Fig.4 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.

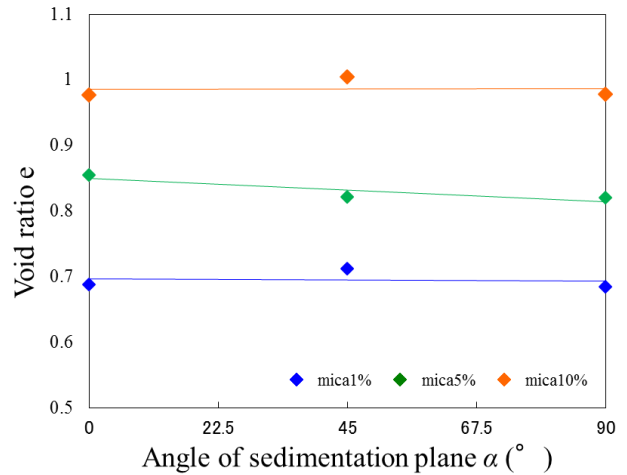


Fig.4 間隙比 e と堆積面 α の関係

4.1 繰返し载荷を含めた LSS 試験と BE 試験の比較

Fig.5~ Fig.13 にマイカ混じり砂および切り出し角別のせん断弾性係数 G とせん断ひずみ ε_s の関係を示す. なお, BE 試験によって得られた初期せん断弾性係数 G_0 および繰返し载荷によって得られたせん断弾性係数 G も示す. Fig.5~ Fig.10 より, マイカ混じり砂 1% および 5% の全ての切り出し角にて, BE 試験による G_0 と繰返し载荷による G が同程度の値を示した. これに単調载荷の結果を組み合わせることで, より明確に弾性領域を確認することができる. マイカを混入したケースでは, 繰返し载荷によるせん断弾性係数 G は, ステージ回数 (繰返しせん断ひずみ) が大きくなるにつれ増加する傾向となった. この原因としてはマイカ粒子の破碎により, 土の物性が変わってしまったことが影響していると考えられる. 粒子破碎が起こる試料については, 多くの繰返し载荷を行うことは悪影響となるため, 今後最適な繰返しせん断ひずみレベルなどを確定していく必要がある.

Fig.11~ Fig.13 のマイカ混じり砂 10% の結果において, BE 試験による初期せん断弾性係数 G_0 と

繰返し载荷によるせん断弾性係数 G の値の差が大きくなっている。これは本研究室の既往研究¹⁾より、1)弾性領域が繰返し試験を行うよりさらに小さなひずみ領域にあること、2)豊浦砂よりマイカ粒子の方が、せん断波伝達速度が速く、BE試験では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 を測定しており、供試体全体の初期せん断弾性係数を測定できないことなどが原因として挙げられる。

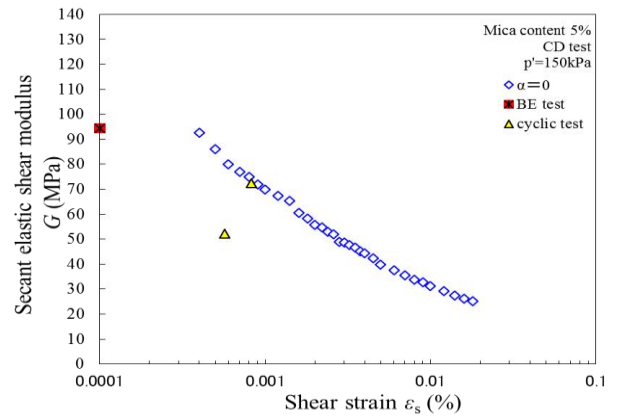


Fig.8 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

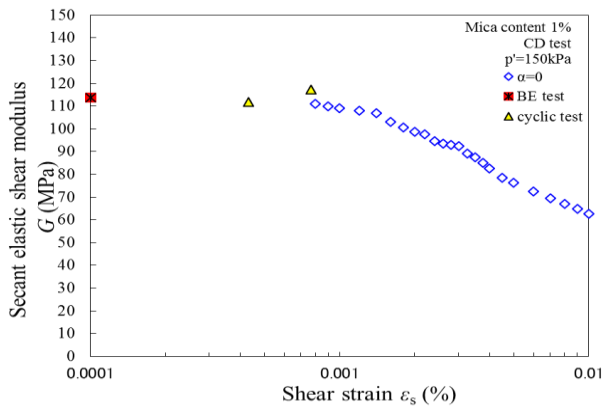


Fig.5 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

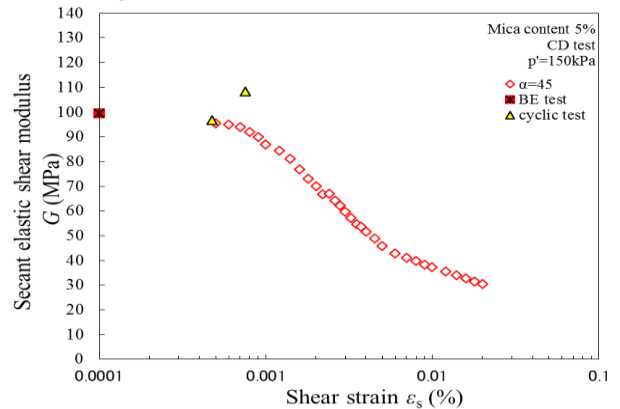


Fig.9 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

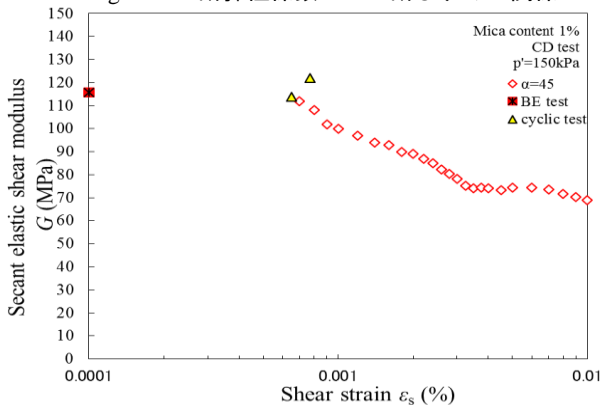


Fig.6 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

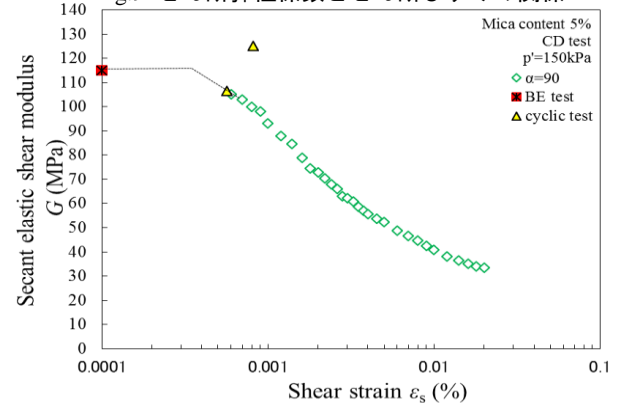


Fig.10 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

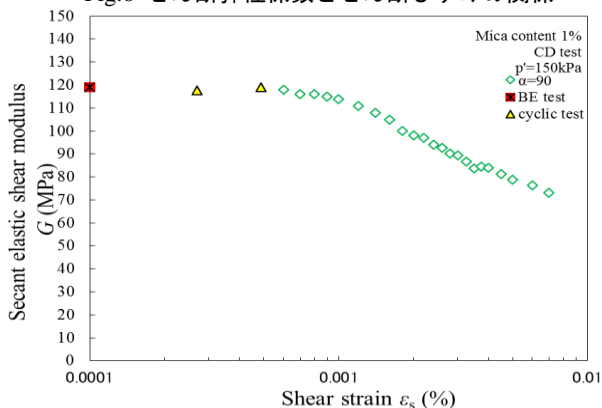


Fig.7 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

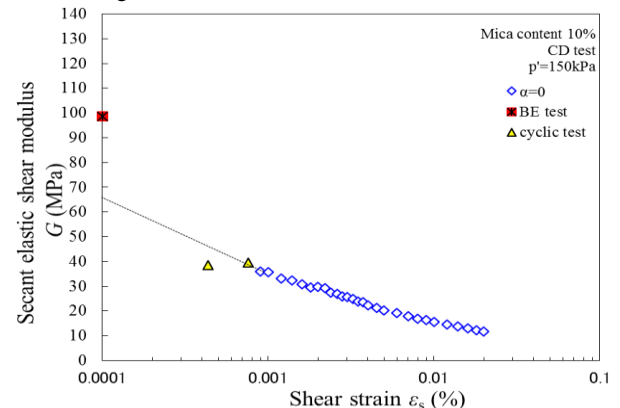


Fig.11 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

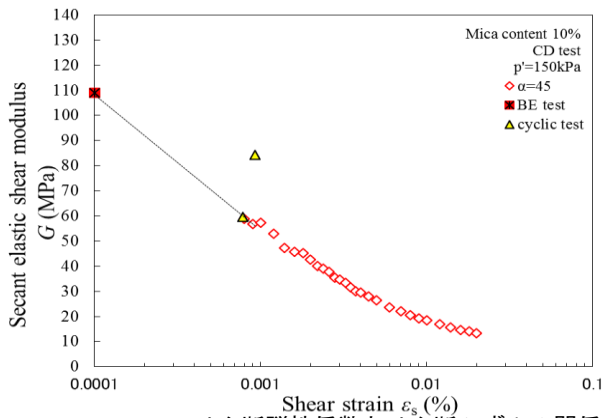


Fig.12 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

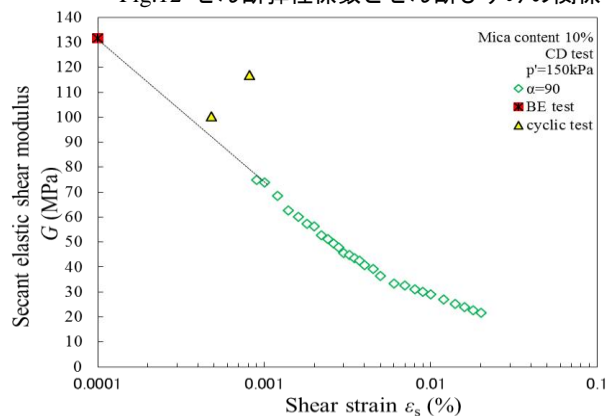


Fig.13 せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

4.2 マイカ混じり砂における弾性領域

Fig.14 にマイカ配合量と全切り出し角の弾性領域を平均した関係を示す。マイカ混合量が増加するほど、弾性領域は減少していく傾向が見られた。既往研究¹⁾では弾性領域の把握にまでは至らなかったが、本試験法の導入により弾性領域の把握が可能となった。

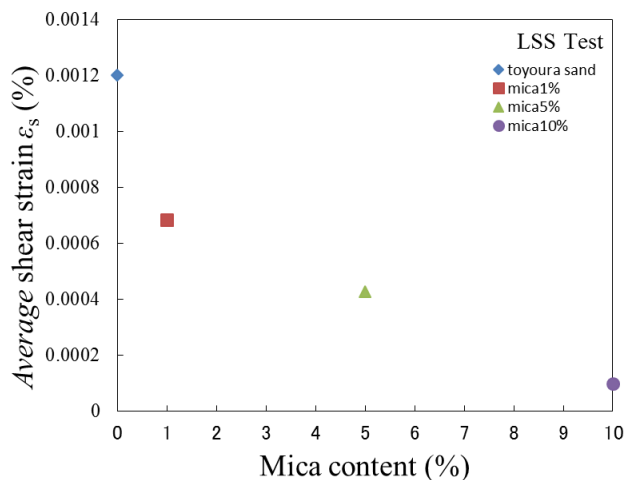


Fig.14 マイカ配合量と平均せん断ひずみの関係

4.3 マイカ混じり砂における変形特性

Fig.15~ Fig.17 に BE 試験, LSS 試験によって得られたせん断ひずみ 0.0005%, 0.001% 時の切り出し角 $\alpha=0^\circ$ の初期せん断弾性係数 G_0 を正規化したものと切り出し角 α の関係を示す。マイカ含有量に関わらず、切り出し角 α が大きくなるほど初期せん断弾性係数 G_0 が増加する結果となった。また、マイカ含有量が多いほど、切り出し角が大きくなるほど、初期せん断弾性係数の増加は大きくなる。既往研究¹⁾でも指摘されているように、砂にマイカが混じることにより、変形特性の異方性が発現することを確認できた。

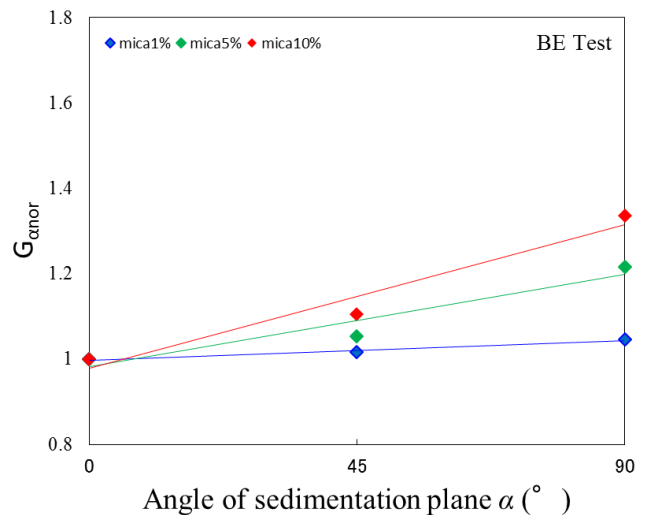


Fig.15 正規化した初期せん断弾性係数と切り出し角の関係

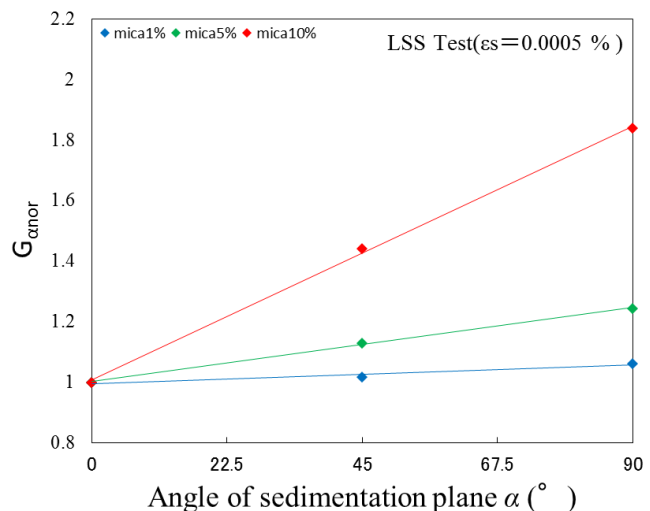


Fig.16 正規化した初期せん断弾性係数と切り出し角の関係

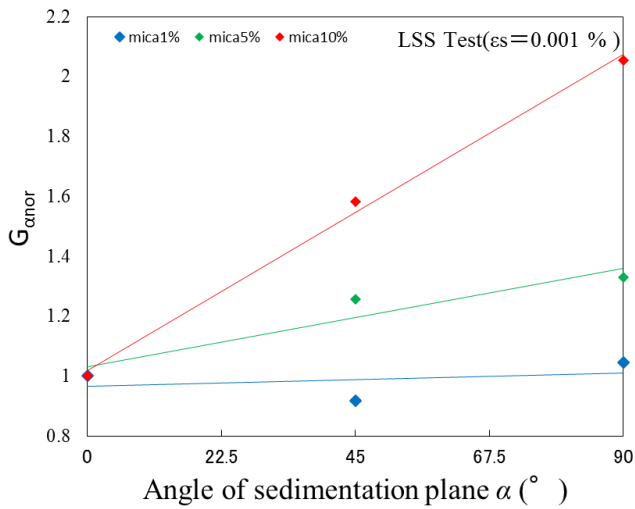


Fig.17 正規化した初期せん断弾性係数と切り出し角の関係

5.まとめ

単調载荷と繰返し载荷を組み合わせることにより、正確なせん断弾性係数 G を算出する手法を提案した。この手法により、弾性領域がより正確に把握できるようになり、マイカ含有量が増加するにつれ、弾性領域が縮小していくことがわかった。さらに、マイカ含有量が増加するにつれて、変形特性に強い異方性が発現することを確認した。

【参考文献】

- 1) 藤川浩理, マイカ混じり砂の変形特性に与える固有異方性の影響, 長岡技術科学大学修士論文, pp.70-104, 2014.3