

固有異方性を有する砂質土が線形弾性挙動を示すひずみ領域

地盤工学研究室 櫻井 高志

指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

近年、近接施工や重要構造物の建設増加に伴い地震応答解析や振動解析などの地盤解析を従来よりも詳細に行う必要性が高まっている。これらの解析には微小ひずみレベルにおける各種変形係数が必要となるが、測定方法はまだ基準化されていない。また、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⁾。しかし、現状ではこれらの異方性が微小ひずみ領域における各種変形係数にどの程度の影響を与えるかについて明らかとなっていない。

既往の研究²⁾では固有異方性に着目し、三軸試験機を用いたベンダーエレメント試験と局所ひずみ測定試験(以下、BE 試験と LSS 試験と記す)を実施した。この結果、豊浦砂のような扁平性の小さな土粒子でも、十分な配向性を与えることで、微小ひずみ領域における各種変形係数や排水強度 q_{max} に影響を与えることが明らかとなった。また、LSS 試験では 0.001% 程度以下のひずみ領域におけるデータのばらつきが大きく、各種変形係数を正確に把握することが困難であったため、データを平均化することでこれらの変形係数を推定していた。しかし、一般的な試料よりも弾性領域が小さなひずみ領域に存在する試料においては、現在の試験方法では各種変形係数を算出できないといった課題が残った。

そこで、本研究では微小ひずみ領域における各種変形係数を精度よく算出するために試験機、試験方法の検討・改善を行い、固有異方性を有する砂質土が線形弾性挙動を示すひずみ領域について明らかにすることを目的とする。

2. 試料および供試体作製方法

試料には豊浦砂を使用した。Fig.1 に豊浦砂の物理特性および粒径加積曲線を示す。豊浦砂は粒径

が揃っており、粒子形状にわずかな扁平性を有する特徴がある。

供試体作製方法は空中落下法とした。この方法はモールド内に試料をふるいから自然落下させ、堆積させる方法である。また、この方法は既往の研究²⁾から、供試体に十分な配向性を与えられることが分かっている。相対密度 D_r が一定となるよう、落下高さは常に一定となるように調整を行った。供試体の成形はトリミング法により行った。供試体の高さは 125mm、直径は 48~49mm となるように成形した。また、固有異方性の影響を調べるために、供試体の堆積角度 α は 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° の 5 パターンとした。本研究における堆積角度 α は Fig.2 の通り定義した。

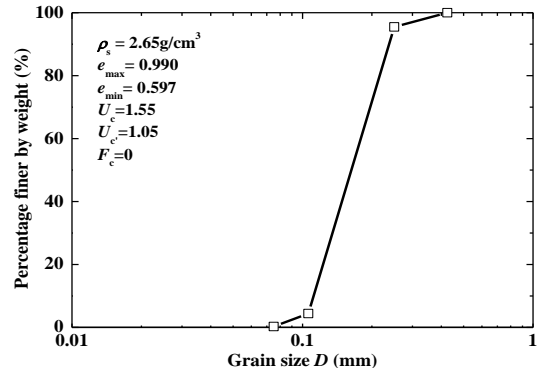


Fig.1 豊浦砂の物理特性および粒径加積曲線

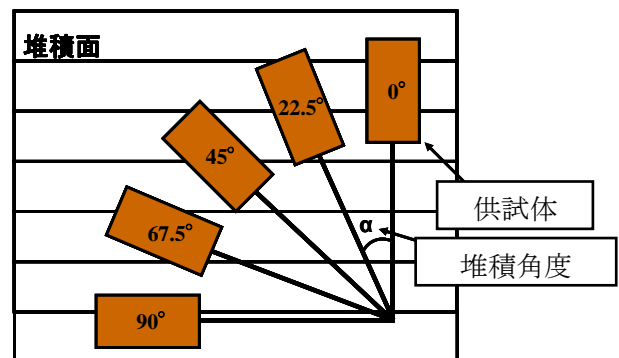


Fig.2 堆積角度 α の定義

3. 試験の流れ

供試体を三軸試験機にセットし、二重負圧法で供試体を飽和後、全ての堆積角度 α 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、BE 試験と LSS 試験を行った。

4. 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、等方圧密終了後、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: $\pm 10V$, 周波数: 15kHz, 20kHz 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 (m/s)およびせん断弾性係数 G (MPa)は Eq.(1)にて算出した。ここに、せん断波の伝播距離 L (m), せん断波の伝播時間 Δt (s), 湿潤密度 ρ_t (g/cm³)である。

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

5. 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 0.0025%/min でせん断を行った。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、局所軸変位測定に二箇所、局所側方変位測定に一箇所設置した。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 (kPa), 有効軸応力 σ'_a (kPa), 有効側方応力 σ'_r (kPa), 割線ヤング率 E (MPa)である。

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

6. 試験機, 試験方法の検討・改善

1. で述べた微小ひずみ領域におけるデータのばらつきを解消するために供試体をセットする

ペDESTALおよび供試体の直径について検討・改善を行った。以下に詳細を述べる。

6.1. ペDESTALの検討・改善

微小ひずみ領域におけるデータのばらつきは剛性の高い試料ほど大きくなる傾向にあった。そこで、試験機のチェックを行ったところ、供試体下部に位置するペDESTALに問題があることがわかった。

昨年度は試験機の構造上、ペDESTALを試験機底盤へ完全に固定することができなかった。そのため、剛性の高い試料の場合、ペDESTALにかかる負荷が増大し、ペDESTAL自体に変位が発生し、軸変位を正確に測定できなかったと考えられる。

そこで本年度はペDESTALの改善を行うことで、ペDESTALと試験機底盤を完全に固定することが可能となり、剛性の高い試料でも軸変位を正確に測定することが可能となった。

6.2. 供試体直径の検討・改善

本研究では供試体とペDESTALの直径が等しいこと、ペDESTALにベンダーエレメントが内蔵されていること、そして供試体作製の都合上、供試体の設置は手作業で行う必要がある。以上の理由から、供試体をペDESTALに正確に設置することは困難である。設置が少しでもずれると、せん断時に供試体は本来と異なる変形を引き起こし、各ひずみを正確に計測することができない。

そこで本研究では、供試体直径を従来の 50mm から 48~49mm 程度に小さく成形することとした。これにより、供試体のペDESTALへの設置がこれまでより容易となり、正確に供試体を設置することが可能となった。供試体の高さは従来通り 125mm とした。

以上のように、ペDESTALの改善と供試体直径の変更を行い、試験を行った。

7. 試験結果

7.1. 供試体条件の比較

Fig.3 に相対密度 D_r -堆積角度 α の関係を示す。

堆積角度 α 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ため、各供試体を一律に比較できるとみなした。

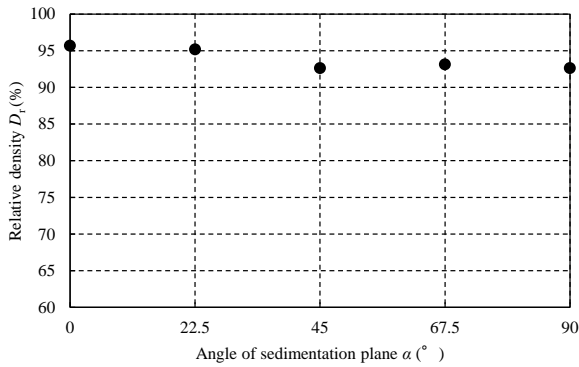


Fig.3 相対密度 D_r -堆積角度 α の関係

7.2. 初期せん断弾性係数の結果

Fig.4にBE試験およびLSS試験から算出された初期せん断弾性係数 G_0 -堆積角度 α の関係を示す。BE試験およびLSS試験の両試験から得られた初期せん断弾性係数 G_0 は堆積角度 α が大きくなるにつれて、増加傾向を示した。また、BE試験よりもLSS試験から得られた初期せん断弾性係数 G_0 のほうが大きな値を示す傾向にあった。

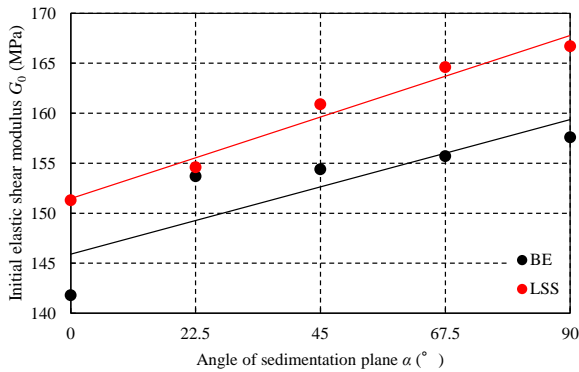
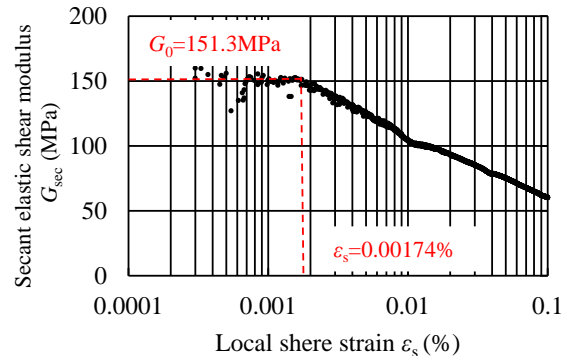


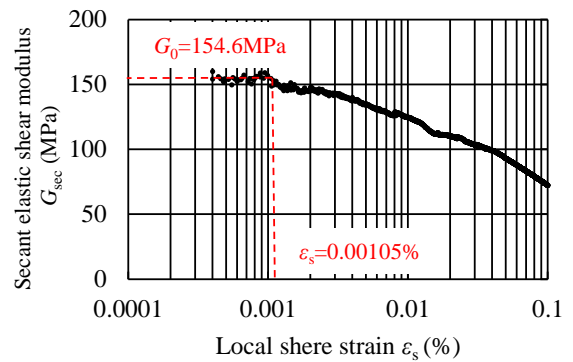
Fig.4 初期せん断弾性係数 G_0 -堆積角度 α の関係

7.3. 弾性限界ひずみの結果

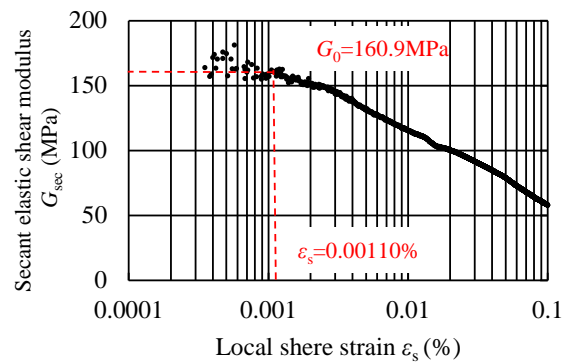
弾性限界ひずみ ϵ_s として、割線せん断弾性係数 G_{sec} が減少しはじめるせん断ひずみを、Fig.5(a)~(e)に示すように読みとった。Fig.6に弾性限界ひずみ ϵ_s -堆積角度 α の関係を示す。弾性限界ひずみ ϵ_s は堆積角度 α が大きくなるにつれて、減少傾向を示した。



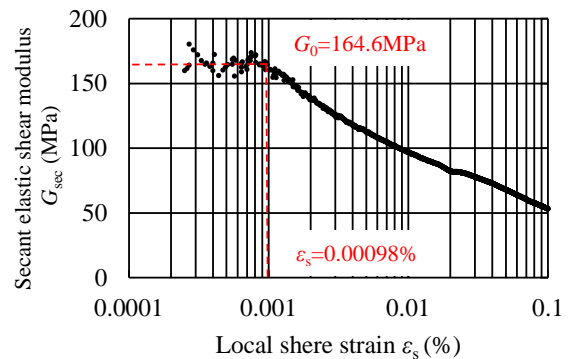
(a) 0°



(b) 22.5°



(c) 45°



(d) 67.5°

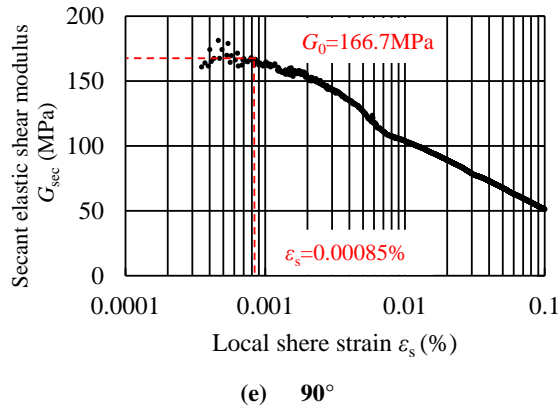


Fig.5 弾性領域の読み取り

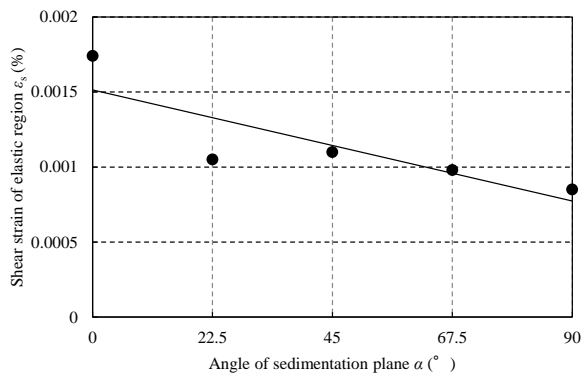


Fig.6 弾性限界ひずみ ϵ_s -堆積角度 α の関係

7.4. 初期せん断弾性係数と排水強度の関係

Fig.7 に既往の研究から得られた排水強度 q_{max} -堆積角度 α の関係を示す. 排水強度 q_{max} は堆積角度 α が大きくなるにつれて, 減少傾向を示した. 一方, Fig.4 に示したように, 初期せん断弾性係数 G_0 は堆積角度 α が大きくなるにつれて, 増加傾向を示した. この二つの結果から初期せん断弾性係数 G_0 と排水強度 q_{max} の間には負の相関性がある.

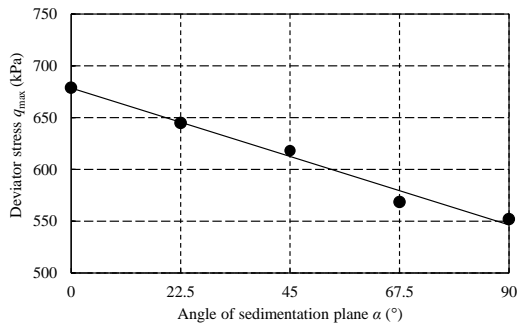


Fig.7 排水強度 q_{max} と堆積角度 α の関係

8. 考察

8.1. BE 試験から得られた初期せん断弾性係数

Fig.8 に BE 試験における微小ひずみ領域の土粒子配列の模式図を示す. 0° と 90° を比較すると, 後者の方がせん断波の伝播方向に対して土粒子の接触箇所が少ない. せん断波は土粒子の接触部より土粒子の剛体部をより速く通過できると考えられる. このため, 接触箇所の少ない 90° の方が 0° よりも速くせん断波が通過することになる. このようなメカニズムにより, Fig.4 に示した通り, 初期せん断弾性係数 G_0 は堆積角度 α が大きくなるにつれて, 増加傾向を示したと考えられる.

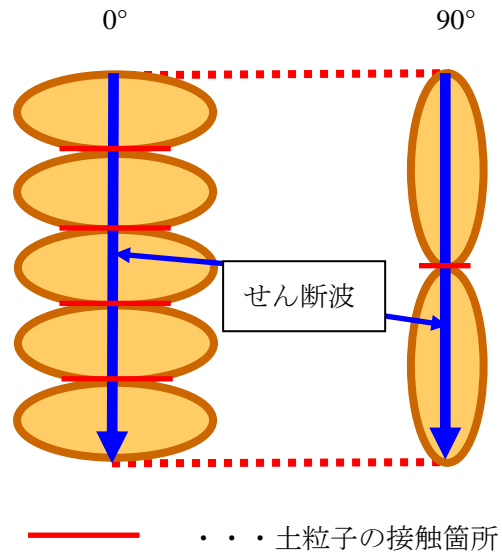


Fig.8 土粒子配列の模式図(BE 試験)

8.2. LSS 試験から得られた初期せん断弾性係数

LSS 試験における微小ひずみ領域に関しても, Fig.9 の模式図を用いて説明する. 0° と 90° を比較すると, 後者の方が外力の载荷方向に対して土粒子の接触箇所が少ない. つまり, 外力に対して 90° の方が 0° よりも多くの土粒子剛体部分で抵抗できるため, 堆積角度 α が大きくなると初期せん断弾性係数 G_0 が大きくなる. このようなメカニズムにより, Fig.4 のように, LSS 試験から得られる初期せん断弾性係数 G_0 は堆積角度 α が大きくなるにつれて, 増加傾向を示したと考えられる.

以上から、BE 試験および LSS 試験の両試験において、初期せん断弾性係数 G_0 は堆積角度 α が大きくなるにつれて増加傾向を示したのは、土粒子の骨格構造、つまり土粒子の堆積角度 α による固有異方性の影響を受けたものであることがわかる。

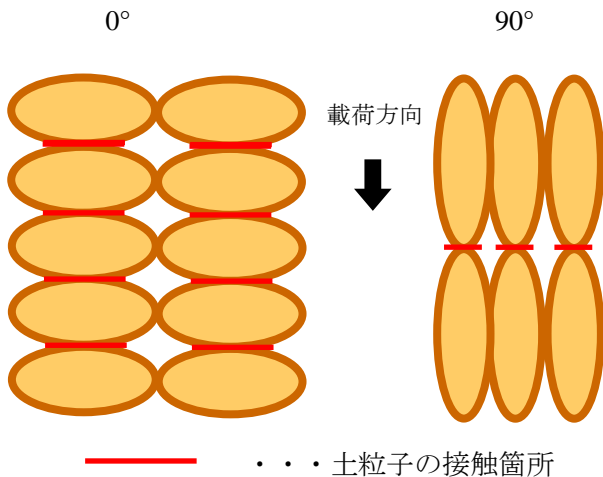


Fig.9 土粒子配列の模式図(LSS 試験)

8.3. 弾性領域および排水強度

LSS 試験から読み取った線形弾性限界について考察する。Fig.9 に示したように、 0° は土粒子の長軸方向が外力の荷重方向に対して横向きであるため、外力に対して安定している。一方、 90° は土粒子の長軸方向が外力の荷重方向に対して縦向きであるため、 0° に比べて外力に対して不安定である。そのため、 90° の方が 0° よりも小さいひずみ領域で土粒子の骨格構造が崩壊すると思われる。その結果、Fig.6 に示したように弾性領域は堆積角度 α が大きくなるにつれて、減少傾向を示したと考えられる。

排水強度 q_{\max} についても同様で、初期の土粒子の骨格構造が崩壊し、せん断が進行した後に最大強度が現れる。つまり土粒子の接触状態が安定している 0° の方が、より大きな強度は発揮すると考えられる。そのため、排水強度 q_{\max} は堆積角度 α が大きくなるにつれて、減少傾向を示したと考えられる。

9. 結論

本研究では、固有異方性を有する砂質土が線形弾性挙動を示すひずみ領域について調べるために、豊浦砂を対象に堆積角度 α を変えて BE 試験および LSS 試験を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 豊浦砂のような扁平性の小さな土粒子でも十分に配向性を有した状態では、固有異方性を発現する。
- 2) 堆積角度 α の増加に伴い、初期せん断弾性係数 G_0 は増加、排水強度 q_{\max} は減少傾向を示すことより、これらの間には負の相関性がある。
- 3) 固有異方性を与えることにより同一試料でも、堆積角度 α の増加に伴い線形弾性挙動を示すひずみ領域は減少していくということが、新たに計測できた。

【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) 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.70-104, 2012.3