

異方性圧密された砂のせん断剛性率のひずみレベル依存性

長岡技術科学大学大学院 高木伸晃
長岡技術科学大学大学院 豊田浩史

1. はじめに

近年、近接施工や重要構造物の建設に伴い、地盤の地震応答解析や振動解析を詳細に行うため、微小ひずみレベル(10^{-6} ~ 10^{-3})における各種変形係数を精度よく求める必要がある。自然の土粒子は多様な形状で存在しているため、様々な粒子骨格構造を構成する。さらに、構造物の建設過程や応力履歴に起因して異方的になることがほとんどである¹⁾。この異方性には堆積時の粒子の配向性や粒子形状による固有異方性と異方応力状態によって形成される誘導異方性がある。しかし、飽和度を対象とする強度に関する異方性は以前から研究されているものの、微小ひずみ領域での変形特性に関する研究は少ない。さらに、不飽和土上に建設される土木構造物は多いにもかかわらず、不飽和土の研究例は少ない。そのため、盛土などの不飽和土の解析には、飽和試験の結果を用いられることが多い。これは、不飽和土は飽和土に比べ、考慮する要因が多く、それによって実験や理論が複雑になるためである。

既往の研究²⁾では、三軸圧縮試験を用いて異方圧密を行うことで誘導異方性を再現し、ベンダーエレメント試験および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。その結果、米山粘性土において飽和状態では、異方圧密状態によって初期せん断剛性率の大きさに変化が生じ、誘導異方性による影響を見ることができた。しかし、不飽和状態においては、異方圧密状態による初期せん断剛性率の変化は見られなかった。

そこで本研究では、豊浦砂を用いて誘導異方性が、飽和及び不飽和、固有異方性による土の微小ひずみ領域から強度に至る範囲の異方性と圧密履歴の関係を明らかにすることを目的としている。

2. 試料及び供試体作製方法

2.1 使用試料

本研究では、誘導異方性を調べるため、豊浦砂を使用した。Fig.1に豊浦砂の粒径加積曲線を示す。豊浦砂は、全国で土質試験に一般的に用いられる標準砂である。

2.2 供試体作製方法

本研究では、空中落下法で堆積角度 0° 、 45° 、 90° 供試体を作製した。空中落下法は試料をふるいから自然落下させて供試体を作製する方法である。その際に、モールドの角度を変えることで堆積角度を決めることができる。本研究では供試体の相対密度 D_r を均一に作製するために、落下高さが常に一定となるように調整を行った。モールド内に乾燥試料を一定量入れた後、水槽内に一定の流速で通水し、試料を水浸させ、一定の水位を保った。水槽の水を取り除いた後、水槽内からモールドを取り出し、負圧により脱水し、直ナイフとトリマーにより直径5cm、高さ12.5cmの円柱形を形成した。

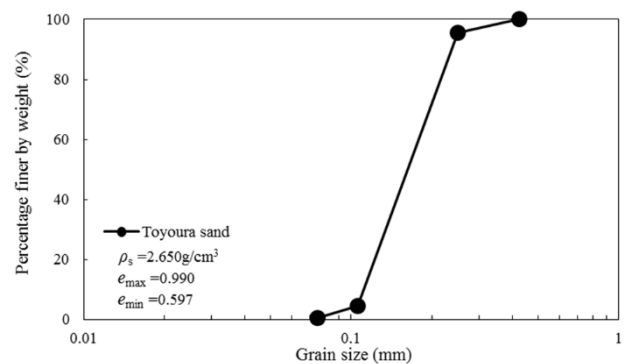


Fig.1 豊浦砂の物理特性および粒径加積曲線

3. 試験方法

3.1 飽和試験の手順

飽和誘導異方性試験は、供試体に二重負圧をかけて飽和させた後 $p'=50\text{kPa}$ で等方圧密を行い、飽和度を高めるために背圧 200kPa をかけた。

$p'=50\text{kPa}$ を一定に保った状態で軸差応力 $q = \sigma'_a - \sigma'_r$ を調整することで、応力比 $K = \sigma'_r / \sigma'_a$ が 0.25, 0.4, 0.6, 1.0, 2.0, 3.0 となる q 载荷ステップを行う。また、応力比 K は、 $K=1$ で等方応力の圧密、 $K<1$ で圧縮状態の異方性圧密、 $K>1$ で伸張状態の異方性圧密となる。その後、応力比 K を一定に保ちながら $p'=150\text{kPa}$ とし、圧密を行った。その後、せん断剛性率を求めるために、ベンダーエレメント試験 (BE 試験) 及び局所微小ひずみ測定試験 (LSS 試験) を行った。ここで、 σ'_r は側方有効応力、 σ'_a は鉛直有効応力である。

3.2 不飽和試験の手順

不飽和誘導異方性試験は、試験の手順の大半が飽和試験と同じであるが、不飽和試験では背圧 200kPa をかけない。しかし、応力比 K を目標値にした後に、供試体上部から空気圧 50kPa 荷重し、供試体の水を抜き飽和度を下げる脱水ステップがある。この後は飽和試験同様 $p'=150\text{kPa}$ まで圧密を行い、その後 BE 試験と局所微小ひずみ測定試験を行った。

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、異方圧密終了後、供試体の軸方向に伝播するせん断波を測定した。本研究において送信波条件を、波形: sin 波, 電圧: $\pm 10\text{V}$, 周波数: 15kHz , 20kHz , 30kHz 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 $V_s(\text{m/s})$ およびせん断剛性率 $G(\text{MPa})$ は Eq.(1) にて算出した。ここに、せん断波の伝播距離 $L(\text{m})$, せん断波の伝播時間 $\Delta t(\text{s})$, 湿潤密度 $\rho_t(\text{kg/m}^3)$ である。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad G = \rho_t V_s^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

5. LSS 試験

排水条件において、局所軸ひずみ $\varepsilon_a(\%)$ および局所せん断ひずみ $\varepsilon_s(\%)$ が 0.1% に達するまで、せん断速度 0.0025mm/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 $\varepsilon_a(\%)$ および局所側方ひずみ $\varepsilon_r(\%)$ 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 $q(\text{kPa})$, 鉛直有効応力 $\sigma'_a(\text{kPa})$, 側方有効応力 $\sigma'_r(\text{kPa})$, 割線ヤング率 $E(\text{MPa})$ である。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r \quad E = \frac{q}{\varepsilon_a} \times 10^{-1} \quad G = \frac{q}{3\varepsilon_s} \times 10^{-1} \quad (2)$$

6. 試験結果 (誘導異方性)

6.1 BE 試験結果

供試体堆積角度 0° の飽和・不飽和試験における BE 試験結果を Fig.2 に、各堆積角度の飽和試験における BE 試験結果を Fig.3 に、各堆積角度の不飽和試験における BE 試験結果を Fig.4 にそれぞれ示す。供試体の密度差による初期せん断剛性率の差をなくすために、Eq.(3) に示す間隙比関数で初期せん断剛性率を割ることで正規化を行っている。

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad (3)$$

Fig.2 より、飽和・不飽和問わず異方応力状態によってせん断剛性率に差が生じており、誘導異方性が発現していることがわかる。また、飽和・不飽和共に傾向も同じで $K=0.4$ でせん断剛性率が最大となり、 $K=1.0$ に近づくにつれ小さく、 $K=2.0$ で一度大きくなってから $K=3.0$ で再び小さくなる。

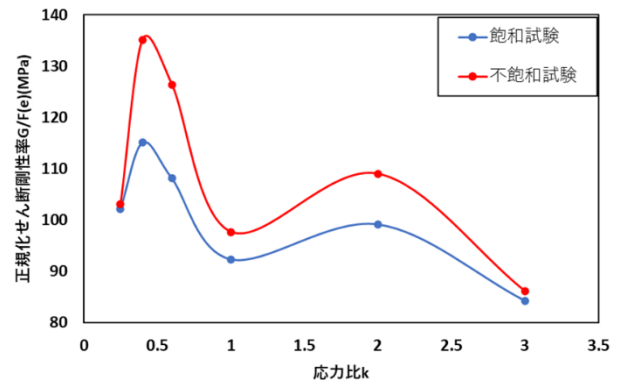


Fig.2 飽和・不飽和試験の BE 試験結果

また、Fig.3 と Fig.4 より、飽和・不飽和共に堆積角度に関係なく異方応力状態によってせん断剛性率が変化していることから、固有異方性が堆積角度による固有異方性が存在する場合でも誘導異方性は発現していることがわかる。

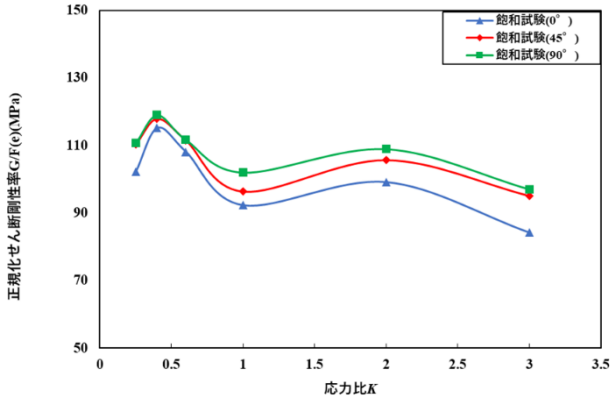


Fig.3 各堆積角度の飽和試験における BE 試験結果

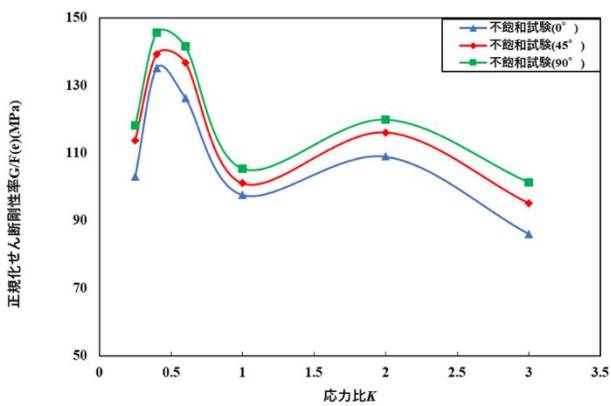


Fig.4 各堆積角度の不飽和試験における BE 試験結果

6.2 LSS 試験結果

供試体堆積角度 0° の飽和・不飽和試験の LSS 結果を Fig.5, Fig.6 にそれぞれ示す。これらの結果から、局所せん断ひずみが 0.001% より小さいとき、飽和・不飽和共に異方応力状態によってせん断剛性率に差が生じていることがわかる。また、圧縮応力状態の際にせん断剛性率は、ひずみが進むごとに大きく減少することがわかる。しかし、伸張応力状態の際にせん断剛性率は、ひずみが小さい場合は圧縮応力状態の時ほど高くないが、ひずみが進むごとに緩やかに減少していき最終的に圧縮応力状態の時のせん断剛性率よりも大きな値となる。局所せん断ひずみが 0.01% のとき、異方応力状態によってせん断剛性率に 5 倍以上の差が生じていることがわかる。

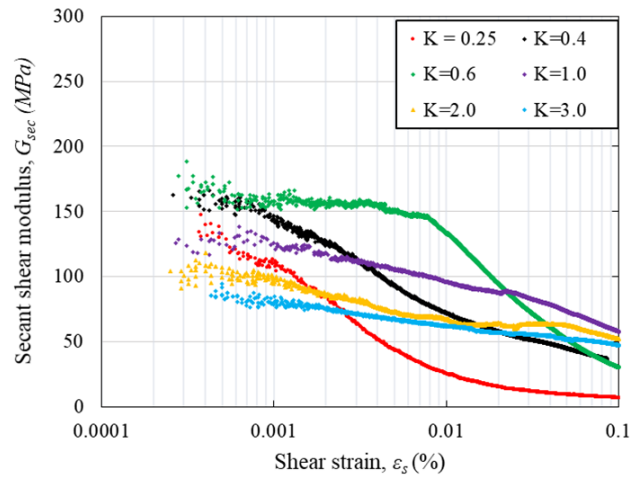


Fig.5 飽和試験の LSS 試験結果

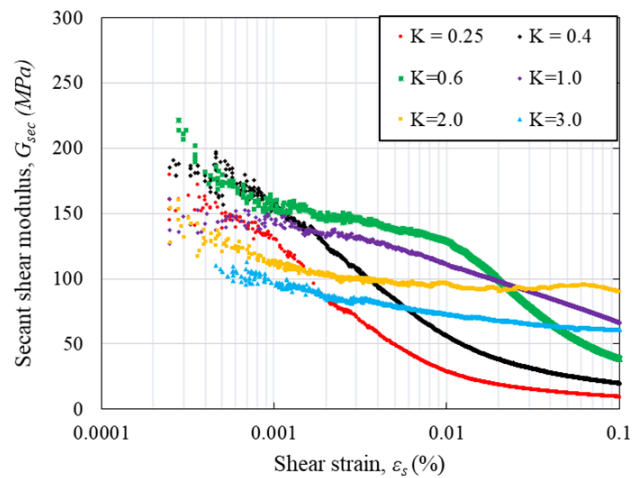


Fig.6 不飽和試験の LSS 試験結果

7. 試験結果 (固有異方性)

7.1 BE 試験結果

飽和・不飽和試験の堆積角度別にまとめた各応力比のせん断剛性率の結果を Fig.7 と Fig.8 に示す。これらの結果から、飽和・不飽和および全ての異方応力状態において、せん断剛性率は堆積角度 90°、45°、0° の順に大きくなる。飽和試験において圧縮応力状態である K=0.25, K=0.4, K=0.6 では、堆積角度 45°、90° に大きな差が生じていない。

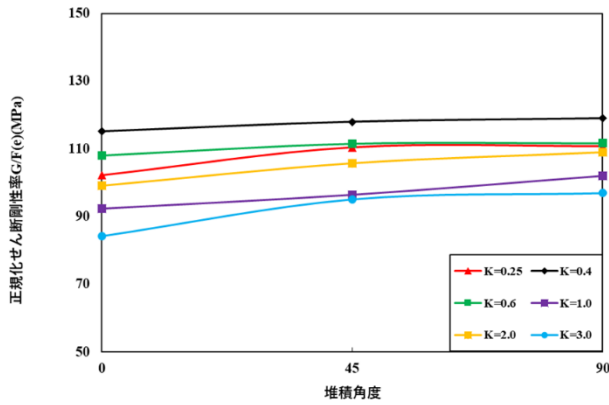


Fig.7 応力比別の堆積角度による飽和 BE 試験結果

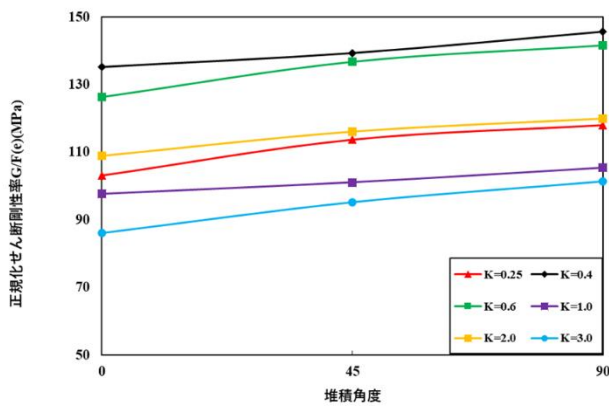


Fig.8 応力比別の堆積角度による不飽和 BE 試験結果

7.2 LSS 試験結果

飽和土に対する、応力比 $K=0.25$, $K=0.4$, $K=0.6$ における各堆積角度の LSS 試験結果をそれぞれ Fig.9, Fig.10, Fig.11 に示す。不飽和土に対する、応力比 $K=0.25$, $K=0.4$, $K=0.6$ における各堆積角度の LSS 試験結果をそれぞれ, Fig.12, Fig.13, Fig.14 に示す。

Fig.9, Fig.10, Fig.11 より、飽和状態において $K=0.25$ は、 0° と 45° のせん断剛性率が局所せん断ひずみ 0.04% で逆転する。また $K=0.4$ では、局所せん断ひずみ 0.006% ですべての角度のせん断剛性率が逆転し、 $K=0.6$ では、 45° と 90° が局所せん断ひずみ 0.004% 付近でせん断剛性率が逆転することがわかる。これにより、堆積角度によって、せん断剛性率のひずみ依存性が異なることがわかる。

Fig.12, Fig.13, Fig.14 より、不飽和状態において $K=0.25$ は、 0° と 45° のせん断剛性率が局所せん断ひずみ 0.007% で逆転する。また $K=0.4$ では、局所せん断ひずみ 0.02% で 45° と 90° のせん断剛

性率が逆転し、 $K=0.6$ では、 45° と 90° が局所せん断ひずみ 0.08% 付近でせん断剛性率が逆転することがわかる。これらの結果より、飽和状態と同様、堆積角度によってせん断剛性率のひずみ依存性は異なることがわかる。

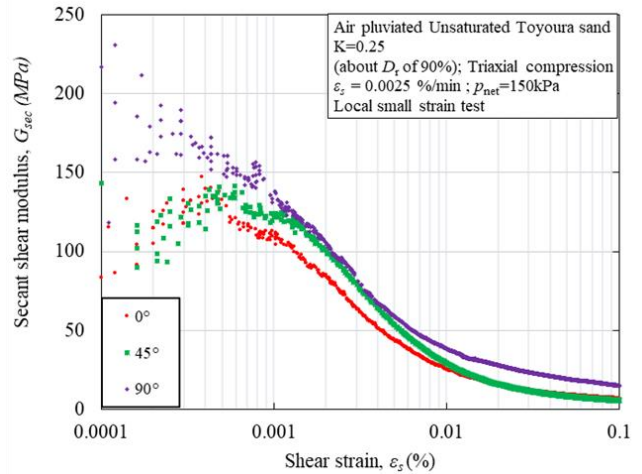


Fig.9 $K=0.25$ における各堆積角度の飽和 LSS 試験結果

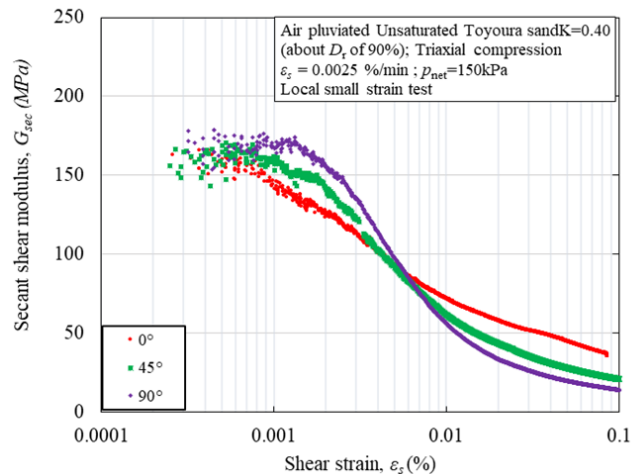


Fig.10 $K=0.4$ における各堆積角度の飽和 LSS 試験結果

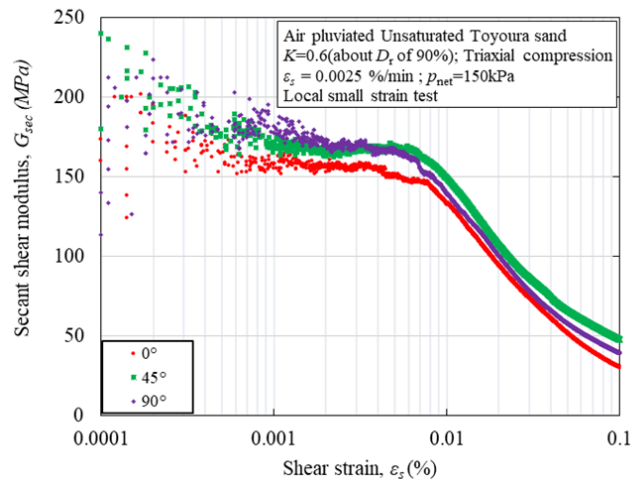


Fig.11 $K=0.6$ における各堆積角度の飽和 LSS 試験結果

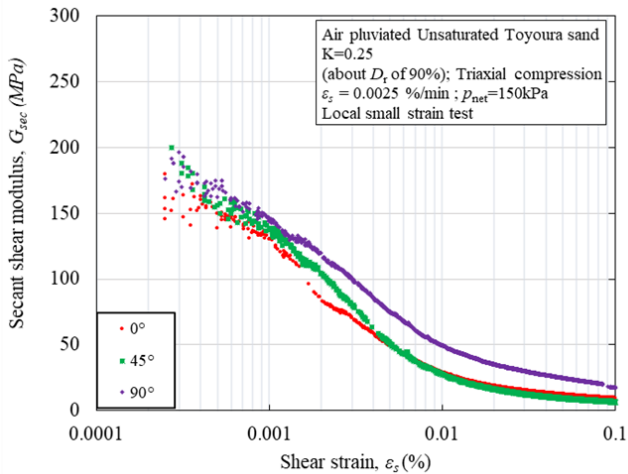


Fig. 12 K=0.25 における各堆積角度の不飽和 LSS 試験結果

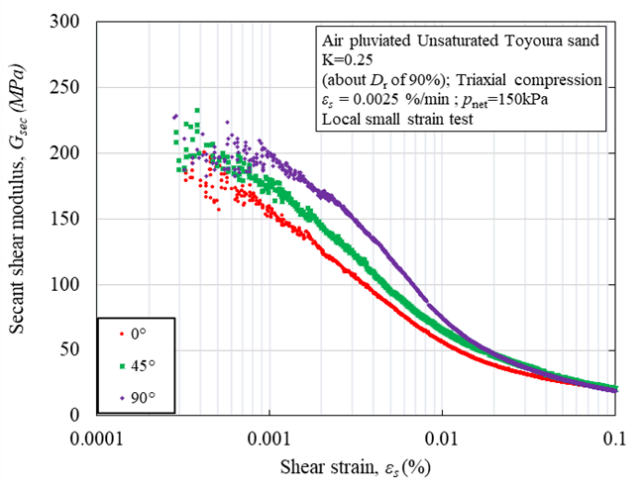


Fig. 13 K=0.4 における各堆積角度の不飽和 LSS 試験結果

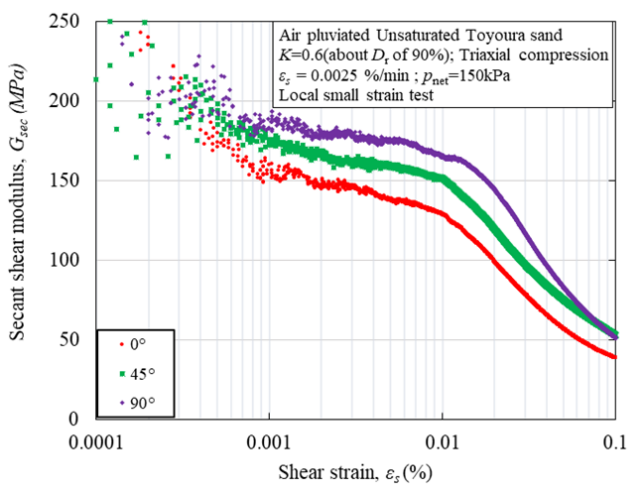


Fig. 14 K=0.6 における各堆積角度の不飽和 LSS 試験結果

8. 既往の研究²⁾との比較

既往の研究²⁾である米山粘性土における誘導異方性の BE・LSS 試験結果と、本研究の豊浦砂における誘導異方性の BE・LSS 試験結果の比較を行う。また、誘導異方性のみの比較を行うため、豊浦砂の試験結果には堆積角度 0° のものを使用する。

8.1 BE 試験結果比較

豊浦砂と米山粘性土の飽和・不飽和 BE 試験結果をそれぞれ Fig.13, Fig.14 に示す。Fig.13 より、豊浦砂と米山粘性土は飽和状態において、誘導異方性によるせん断剛性率の変化は、 $K=0.4$ 付近で最大となり、 $K=1.0$ に近づくと小さくなり、 $K=2.0$ で再び大きくなりそれ以降小さくなるといった、似た傾向にあることがわかる。しかし、Fig.14 より、不飽和状態においては全く傾向が異なっていることがわかる。これは、サクシオンが豊浦砂は 50kPa であるが、米山粘性土は 300kPa であること、また、力学特性に与えるサクシオンの効果が砂より粘性土の方が大きいためであると考えられる。

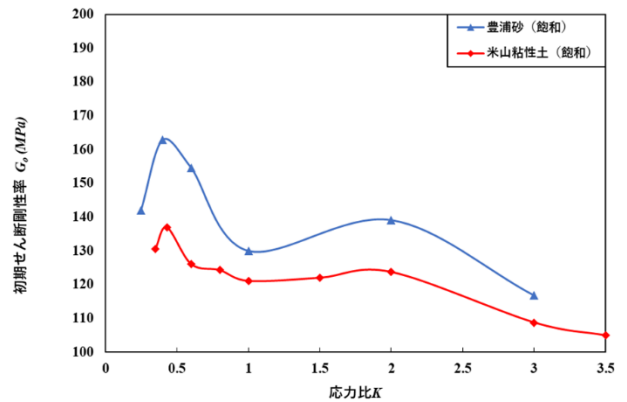


Fig. 13 豊浦砂と米山粘性土の飽和 BE 試験結果

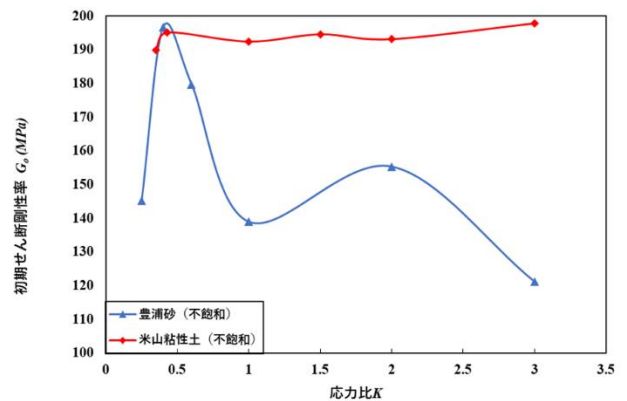


Fig. 14 豊浦砂と米山粘性土の不飽和 BE 試験結果

8.2 LSS 試験結果比較

米山粘性土における飽和・不飽和 LSS 試験結果を Fig.15, Fig.16 に示す。これらの結果より、豊浦砂の LSS 試験結果である Fig.5, Fig.6 とそれぞれ比較すると、飽和・不飽和共に局所せん断ひずみが 0.001%付近では、米山粘性土より豊浦砂の方が異方応力状態によるせん断剛性率の差が大きいことはわかる。また、飽和状態の圧縮応力状態は、豊浦砂の方が局所せん断ひずみが大きくなるにつれ、せん断剛性率も大きく減少している。しかし、伸張応力状態では、米山粘性土の方がせん断剛性率の減少が大きい。また、不飽和状態では、圧縮・伸張応力状態共に米山粘性土の方が剛性率の減少は大きくなる。

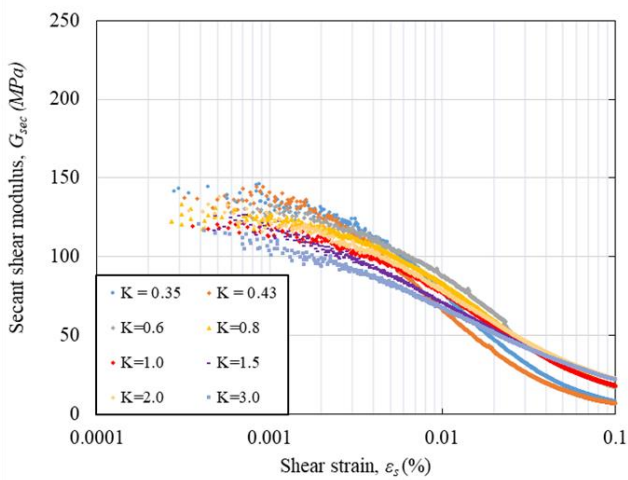


Fig.15 米山粘性土の飽和 LSS 試験結果²⁾

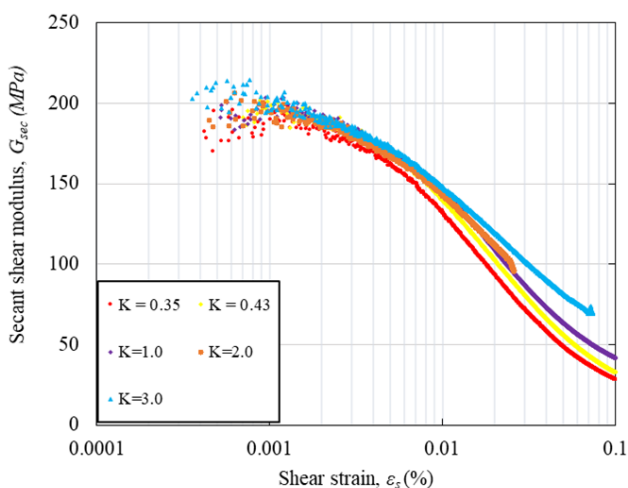


Fig.16 米山粘性土の不飽和 LSS 試験結果²⁾

9. まとめ

初期せん断剛性率に関して、飽和・不飽和状態、固有異方性の有無に関わらず誘導異方性が見られた。また、堆積角度によって、初期せん断剛性率は変化することがわかった。割線せん断剛性率に関して、異方圧密応力比 K によってせん断剛性率のひずみ軟化が大きく変わることがわかった。この挙動は、米山粘性土では見られなかった傾向である。また、堆積角度によるひずみ軟化の傾向は、概ね似た傾向にあるが、飽和状態の応力比 $K=0.4$ では異なる。以上のことから、地盤の強度解析を行うにあたって、応力状態や堆積角度も考慮する必要があるといえる。

【参考文献】

- 1) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2010.
- 2) Le Ngoc Bao：Evaluation of mechanical anisotropy of soils considering particle orientation and principal stress ratio，長岡技術科学大学博士論文，2020,6