

異方圧密された粘性土の力学特性に関する研究

長岡技術科学大学大学院 非会員 高木伸晃
長岡技術科学大学 正会員 豊田浩史
長岡技術科学大学 正会員 高田 晋
長岡技術科学大学大学院 LE NGOC BAO

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している。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。

飽和土を対象として、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。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。

そこで本研究では、誘導異方性に着目して、飽和及び不飽和土の微小ひずみ領域から強度に至るまでの異方性と異方圧密履歴の関係を明らかにすることを目的とする。

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、新潟県柏崎市米山付近より採取した米山粘性土を使用した。米山粘性土は粒子サイズの割合が0.075mm未満の細粒分が90%を占める。図-1に米山粘性土と豊浦砂の粒径分布を示す。この粒径分布が示すように、標準砂である豊浦砂よりも粒径分布が広い。

2.2 供試体作製方法

本研究では、乾燥状態の米山粘性土に蒸留水を

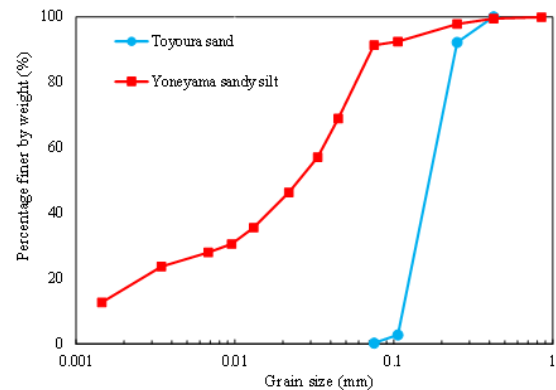


図-1. 米山粘性土と豊浦砂の粒径分布図

加えスラリー状にして、圧密容器を使って45kPaで一次圧密を行い、これによってできた土塊から直径50mm、高さ12.5mmの円柱供試体をワイヤソーとトリマーにより形成した。

3. 試験方法

3.1 飽和試験の手順

飽和土の誘導異方性試験は、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応力比 $K = \sigma'_h / \sigma'_v$ が目標値である0.35, 0.43, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 3.5になるまで排水せん断を行う。この時の軸変位速度は0.005mm/minである。また、応力比 K は、 $K=1$ で等方圧密、 $K<1$ で圧縮方向の異方圧密、 $K>1$ で伸張方向の異方圧密となる。その後、応力比 K を一定に保ちながら $p'=100\text{kPa}$, 200kPa, 300kPaの順に p' の値を上げ、各値で1日圧密を行った。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'_h は側方有効応力、 σ'_v は鉛直有効応力である。

3.2 不飽和試験の手順

不飽和土の誘導異方性試験は、試験の手順の大半が飽和試験と一緒にあるが、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 400kPa 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 $p'=300\text{kPa}$ まで圧密を行い、1 日圧密後 BE 試験と局所微小ひずみ測定試験を行った。

3.3 BE 試験

三軸試験機の供試体上下に取り付けるキャップ、ペDESTAL に BE を装着し、圧密終了後に三軸供試体の軸方向に伝搬するせん断波速度 V_s を測定した。本研究では、送信波条件を波形：sin 波 1 波、電圧： $\pm 10\text{V}$ 、周波数：10kHz, 15kHz, 20kHz とした。送受信波伝搬時間 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.(1)) せん断剛性率 G_0 を求めた。また、伝搬時間の同定法は T.D.法の start-to-start を適用した。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t}, G_0 = \rho_t \cdot V_s^2 \cdot \dots (1)$$

3.4 LSS 試験

排水条件において局所軸ひずみ ε_a 及び局所せん断ひずみ ε_s が 0.1% に達するまで、軸変位速度 0.0025mm/min で行った。

LSS 試験では、軸変位及び側方変位の測定には、非接触型変位計を利用しており、局所軸変位測定に 2 箇所、局所側方変位測定に 1 箇所設置した。これらの変位計より局所軸ひずみ ε_a 及び局所側方ひずみ 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)、軸有効応力 σ'_a (kPa)、側方有効応力 σ'_r (kPa)、割線ヤング率 E (kPa)、割線せん断剛性率 G_{sec} である。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r, E = \frac{q}{\varepsilon_a}, G_{sec} = \frac{q}{3\varepsilon_s} \cdot \dots (2)$$

4. 試験結果

4.1 飽和土の試験

4.1.1 BE 試験結果

飽和試験における BE 試験結果を図-2 に示す。この図より、飽和している米山粘性土は、 $K < 1$ で圧

密された応力状態では、 K が 0.43 の時にせん断剛性率が最大となり、その後の $K=0.6$, $K=0.8$ は等方応力状態である $K=1$ の値に近づいていく。また、 $K > 1$ の伸張応力状態となると、 $K=2.0$ で値が最大となり、 $K=3.0$ で大幅にせん断剛性率が減少する。これらのことから、米山粘性土のせん断剛性率に誘導異方性の影響が現れていることがわかる。

4.1.2 LSS 試験結果

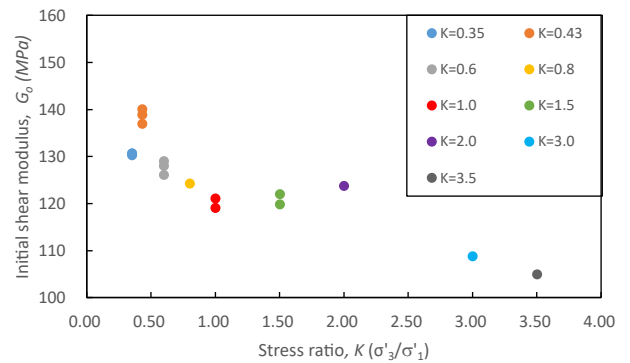


図-2. 飽和土の BE 試験結果

図-3 に飽和試験の $K < 1$ の LSS 試験結果を、図-4 に $K > 1$ の LSS 試験結果を示す。図-3 より、割線せん断剛性率は、せん断ひずみが 0.001% より小さいと $K=0.43$ が最大の値を示すが、せん断ひずみ 0.005% 付近から大幅に値が減少していき、0.1% では一番小さな値となっている。一方、 $K=0.6$, 0.8, 1.0 は 0.01% 付近を境に $K=0.35$, $K=0.43$ より値が大きい状態で減少している。その後、0.03% で 3 つの K でほとんど同じ値となるが、0.1% 時にはわずかに $K=1.0$ が大きくなるという結果となった。つまり、圧縮応力状態である $K > 1$ の時は、割線せん断剛性率は、せん断ひずみが 0.001% までは、 $K=0.43$, 0.35 で大きい傾向を見せるが、その後は急激に減少する。一方で、せん断ひずみが大きくなると、大きさは逆転し $K=1.0$ に近い値ほど強い傾向にあるということがわかる。

図-4 より、 $K > 1$ の伸張応力状態である場合、割線せん断剛性率は $K=2.0$ が常に一番大きい値を示している。一方で、 $K=1.5$, 3.0 はせん断ひずみが小さいときは $K=1.0$ の値よりも小さいが、せん断ひずみ 0.03% 付近から $K=1.0$ の値よりも大きくなり逆転していることがわかる。これは、 $K=1.0$ が 0.01% を超えるあたりから、値の減少が $K=1.5$, 2.0, 3.0 よりも大きいためであることがグラフから

わかる。

これらの結果より、LSS 試験においても米山粘性土に対する誘導異方性の影響が見て取れた。特に、せん断ひずみが 0.01% を過ぎると、 G_{sec} の大きさは K によって減少する割合に違いが生じていることがわかった。

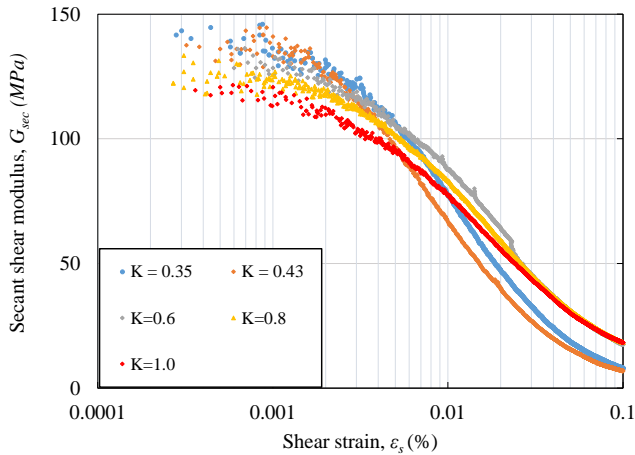


図-3. 飽和土の LSS 試験結果 ($K < 1$)

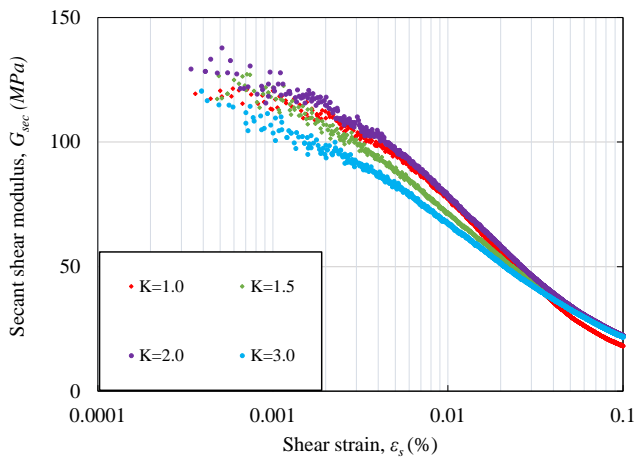


図-4. 飽和土の LSS 試験結果 ($K > 1$)

4.2 不飽和土の試験

4.2.1 BE 試験結果

不飽和試験における BE 試験結果を図-5 に示す。この図から、せん断剛性率 G_0 ほどの K でも同じような値となっていることがわかる。ここから、不飽和米山粘性土におけるせん断剛性率は誘導異方性の影響がほとんどないことがわかる。

4.2.2 LSS 試験結果

図-6 に不飽和土の $K < 1$ の LSS 試験結果を、図-7 に $K > 1$ の LSS 試験結果を示す。図-6 より、 $K=0.43$, 1.0 の割線せん断剛性率は近い値であるが、せん断ひずみ 0.06% 付近から $K=1.0$ の値が $K=0.43$ より大きくなっていることがわかる。よっ

て、 $K < 1$ においては $K=1.0$ に近くなるほど G_{sec} の値が大きくなることがわかる。

図-7 より、せん断ひずみ 0.01% までは、 $K=1.0$, 2.0 , 3.0 の割線せん断剛性率はほぼ同じであるが、0.01% を超えると $K=3.0$ の値が一番大きくなっていることがわかる。

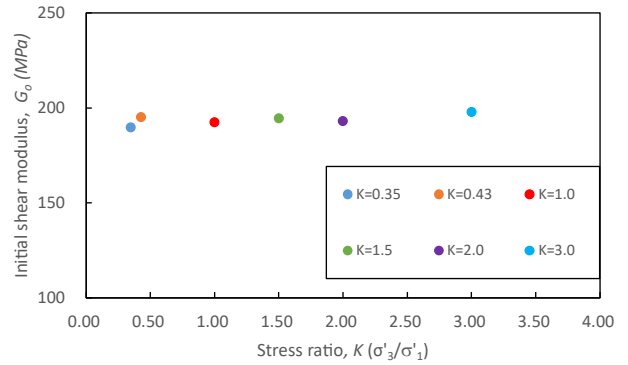


図-5. 不飽和土の BE 試験結果

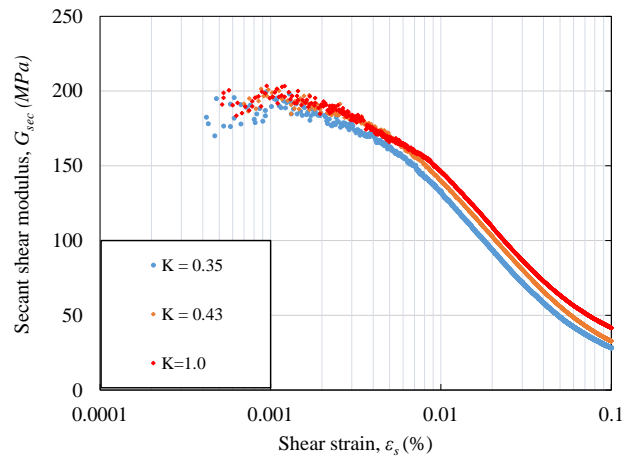


図-6. 不飽和土の LSS 試験結果 ($K < 1$)

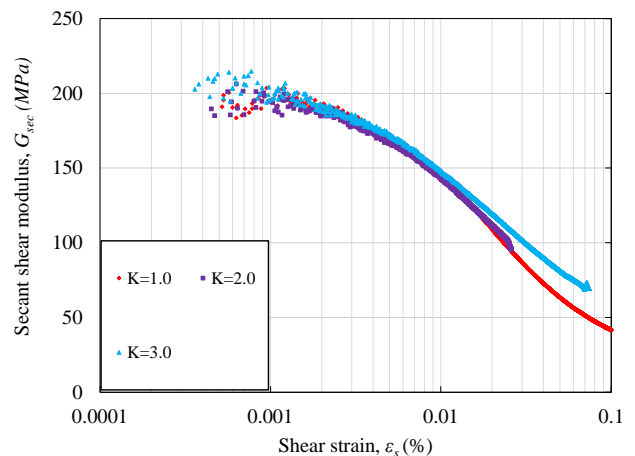


図-7. 不飽和土の LSS 試験結果 ($K > 1$)

4.3 飽和土と不飽和土の比較

4.3.1 BE 試験

飽和土と不飽和土の BE 試験結果を図-8 に示す。この図から、飽和土よりも不飽和土の方がせん断剛性率 G_0 は大きい値となっていることがわかる。また、飽和土で見られた応力比 K によるせん断剛性率の変化が不飽和土には見られないことがわか

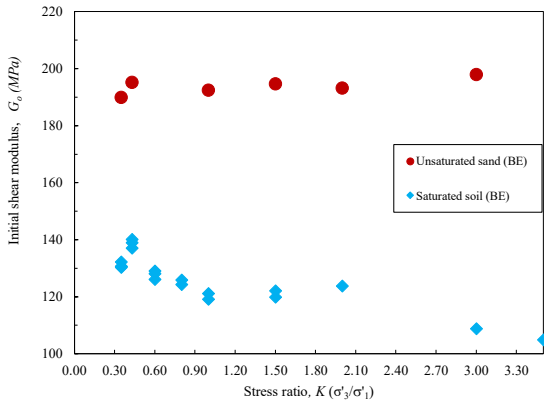


図-8. 飽和土と不飽和土の BE 試験

る。

4.3.2 LSS 試験

図-9 に飽和土と不飽和土で行った LSS 試験結果を示す。この図から、BE 試験同様飽和土よりも不飽和土の方がせん断剛性率 G_0 は大きい。また、応力比 K による変化は、BE 試験同様、不飽和土には見られなかった。

BE 試験, LSS 試験において、不飽和土の G_0 が大きいのは、マトリックサクションが影響を与えていると考えられる。

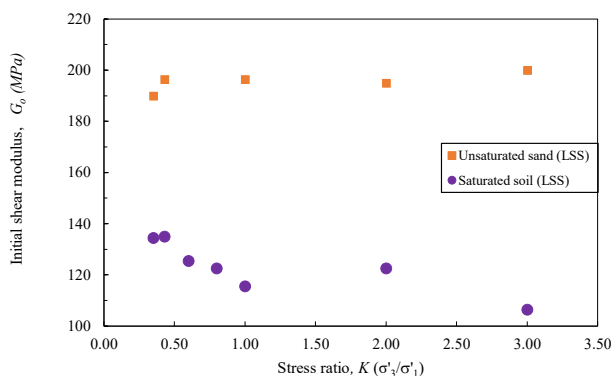


図-9. 飽和土と不飽和土の LSS 試験

5. 結論

本研究で得られた結果より、以下の結論が得られた。

- 1) 飽和試験において、応力比 K の変化によってせん断剛性率に、誘導異方性の影響が見られた。一方で、不飽和試験においては、応力比 K によらず一定で、誘導異方性はほとんど存在しないことがわかった。
- 2) 飽和土において、伸張圧密状態 ($K>1$) におけるせん断剛性率は、圧縮圧密状態 ($K<1$) よりも小さくなる。
- 3) 飽和土に比べ、不飽和土のせん断剛性率が大きいのは、不飽和土においては、マトリックサクションがせん断剛性率に影響を与えているためである。
- 4) 米山粘性土は、飽和状態にあるとき、割線せん断剛性率は誘導異方性の影響を大きく受けるが、不飽和状態では誘導異方性の影響は小さい。

【参考文献】

- 1) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2011。