

北海道大学工学部

正会員 ○ 澁谷 啓

北海道大学工学部

正会員 三田地 利之

はじめに

土のような粒子の集合体において、厳密な意味での弾性的挙動(繰返し載荷時の応力・ひずみ μ - ρ が同一経路をたどり履歴減衰がゼロ)は存在しないかもしれない¹⁾。しかし、過去において過圧密応力履歴やひずみ履歴(クリープ変形も含む)を全く受けていない地盤はまれであり、室内試験でこのような供試体を得ることも難しい。したがって、工学的な意味での擬似的な弾性せん断剛性率、即ち『せん断速度、繰返し載荷回数、繰返しせん断ひずみ履歴、載荷パターン(単調/繰返し載荷)、等に依存しない土質材料のせん断剛性』が観察されても不思議ではない。ここでは、室内再構成粘性土を用いた一連のねじりおよび三軸試験結果をもとに、粘性土の擬似弾性せん断剛性率について考察する。なお、実験の詳細は、文献2), 3)を参照されたい。

実験による粘性土の弾性せん断剛性率の検証

せん断ひずみ速度の影響：図1は、室内においてスリーから再圧密したカオリン粘土($I_p=26$)および清幌粘性土($I_p=16$)供試体を用いた非排水繰返しねじりせん断試験の結果である。所定の等方圧密圧力 p'_c (予圧密圧力の1.7倍以上)まで圧密後、せん断ひずみ制御による載荷周波数(f)一定のもとで繰返しせん断を行った²⁾。片振幅繰返しせん断ひずみ(γ_{SA})を段階的に増加させたいわゆるステップテストでは、せん断ひずみ速度($d\gamma/dt$) = $4f \cdot \gamma_{SA}$ である。いずれの試料の場合も、 $\gamma_{SA} < 2 \times 10^{-5}$ において、等価せん断剛性率(G_{eq})は、載荷周波数によらずほぼ一定かつ最大値(G_{max})を示している。

載荷回数(N)の影響：図2は、カオリン粘土の試験結果の一例であり、 G_{eq} を $N=2$ の値で除して無次元化している。 $\gamma_{SA} < 2 \times 10^{-4}$ における各ステップにおいて、 G_{eq} は $N(=20)$ によらず一定であった。また、この程度の小ひずみレベルでは繰返し載荷時の過剰間隙水圧 Δu_{ex} の発生は殆どないことが分かる。

繰返しせん断ひずみ履歴の影響：一連のねじりせん断試験では、ステップ間に微小ひずみレベル($\gamma_{SA} = 1 \times 10^{-5}$)での繰返し載荷(以下、基準ステップと呼ぶ)を行った。図3は、基準ステップでの G_{eq} をそれまでにうけた γ_{SA} の最大値に対してプロットしたものである。 G_{max} (virgin)および G_{max} (prestrained)は、それぞれひずみ履歴のない第一ステップでの G_{eq} (図1における各試験の最小の γ_{SA} に対応する G_{eq})およびその後の基準ステップでの G_{eq} である。最大 1×10^{-3} の繰返しせん断ひずみ履歴($N=20$)に対して、微小ひずみレベルでの G_{eq} の増加は高々5%程度である。これは繰返し載荷による僅かな密度増加によるものであり⁴⁾、基準ステップの G_{eq} はこの程度の繰返しせん断ひずみ履歴の影響を殆ど受けないことがわかる。

単調および繰返し載荷試験の比較：清幌粘性土の $p'_c=300$ kPaの供試体群(図1参照)における単調載荷試験(せん断ひずみ速度 $0.05\%/min$)での割線せん断剛性率(G_{sc})および繰返し載荷試験での G_{eq} の比較から、 $\gamma < 2 \times 10^{-5}$ の微小ひずみレベルにおいて両者のせん断剛性率はよく一致している。

履歴減衰係数(h)：図4は、カオリン粘土の非排水繰返し三軸試験³⁾でのヒステリシス μ - ρ に及ぼす f の影響の例である。 $f=0.01$ Hzを用いた試験の方が同じせん断応力に対応する接線せん断剛性率が小さい。その結果、同一ひずみレベルでは f が小さい程(せん断ひずみ速度が小さい程) h が大きかった²⁾ ³⁾。微小ひずみレベル($\gamma_{SA} < 2 \times 10^{-5}$)においても同様の傾向が見られたが、いずれの試料においても $f=0.01$ Hz付近での h の値は $0.005(0.5\%)$ 以下であった(文献2の図12参照)。

弾性せん断剛性率(G_{max})の定式化

正規圧密再構成粘性土の G_{max} の圧密圧力依存性は、下式で定式化できる(文献2の図5参照)。

$$G_{max} = (G_{max})_{100} (p'_c/100)^m \text{ (kPa)}$$

ここで、 $(G_{max})_{100}$ は $p'_c=100$ kPaにおける G_{max} の値(カオリン粘土： $(G_{max})_{100}=28,000$ kPa、清幌粘性土： $(G_{max})_{100}=22,000$ kPa)であり、指数 m の値はいずれの試料でも 0.8 であった。また、 G_{max} は非排水せん断強度 τ_{max} の500倍程度である(図5)。

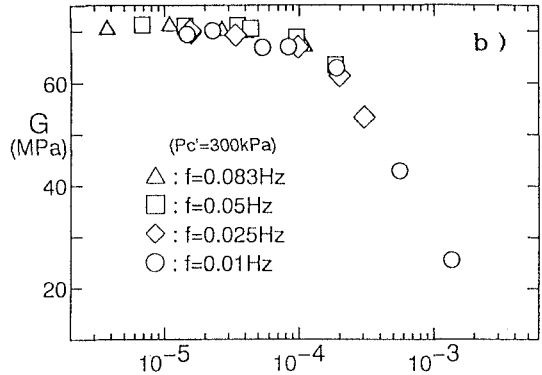
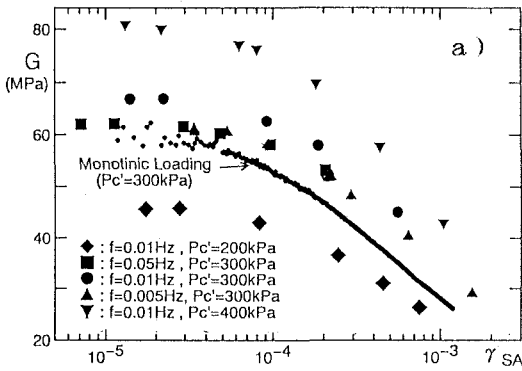


図1 せん断剛性率のひずみレベル依存性 (a:清幌粘性土、b:カオリン粘土)

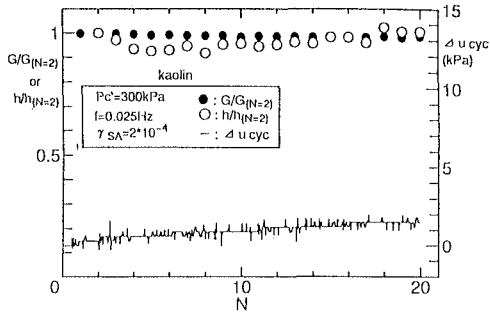


図2 せん断剛性率に及ぼす載荷回数の影響
(カオリン粘土のねじりせん断試験)

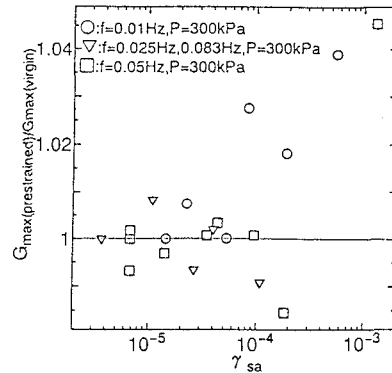


図3 基準ステージでのせん断剛性率の変化
(ねじりせん断試験)

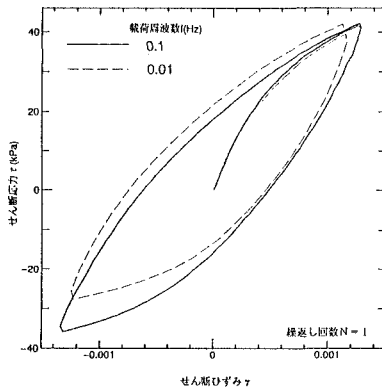


図4 履歴ループに及ぼす周波数の影響
(カオリン粘土の三軸試験)

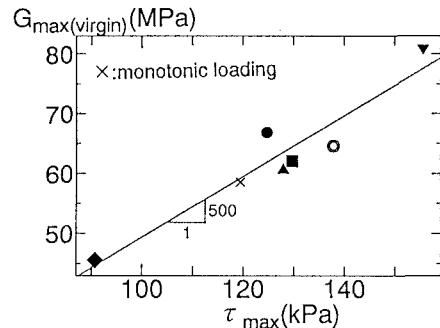


図5 弾性せん断剛性率と非排水せん断強度の関係
(清幌粘性土のねじりせん断試験)

まとめ：正規圧密状態にある室内再構成粘性土におけるせん断ひずみレベル 2×10^{-5} 以下でのせん断剛性率は、せん断速度、載荷回数、繰返しせん断ひずみ履歴、載荷パターンによらない弾性せん断剛性率 G_{max} である。圧密圧力200～500kPaの範囲において、 G_{max} の値は拘束圧の0.8乗に比例し、非排水せん断強度の500倍程度であった。不攪乱粘性土試料についても同様の結論を得ている（文献5参照）。

参考文献：1) Johnson, K.L.(1985):Contact Mechanics, Cambridge Univ. Press. 2)出越貴弘ら(1993):ねじりせん断による粘性土の非排水繰返し変形特性に及ぼす諸要因の影響、第28回土質工学研究発表会。3)澁谷 啓ら(1993):高分解能・高トルクモーターを用いた多機能全自動三軸試験装置の試作、第28回土質工学研究発表会。4)三野秀作(1993):繰返しねじりせん断試験による粘性土の微小ひずみレベルでの変形特性、北海道大学卒業論文。5)澁谷 啓ら(1993):いくつかの沖積粘性土地盤のせん断剛性率（その2）、第28回土質工学研究発表会。