

砂の小ひずみ変形特性にあたる主応力方向の影響

山口大学大学院 学生会員 ○矢野修平 富尾祥一
 山口大学工学部 正会員 中田幸男 村田秀一
 山口大学大学院 正会員 兵動正幸

1. まえがき

変形特性を表わす物性には、ヤング率 E ・せん断剛性率 G ・ポアソン比 ν ・体積弾性係数 K などが挙げられ、このような変形特性は間隙比・拘束圧・ひずみ・応力状態に依存することが知られている。これまで、三軸供試体を対象とした変形試験やベンダーエレメントを用いた試験で評価されてきた（例えば1）。また、応力状態が明確で、かつ1つのせん断応力と3つの直応力を独立に制御でき、供試体に広範な応力状態を再現できる中空ねじりせん断試験機を用いた試験も行われてきている²⁾。本研究では、主応力方向の異なる条件あるいは、主応力方向の回転の履歴をうけた供試体に対し、小ひずみ (10^{-4}) の繰返しねじりせん断载荷を与え、せん断剛性の変化について検討した。

2. 大型中空ねじりせん断試験機

図1に本研究に用いた大型中空ねじりせん断試験機を示す。供試体寸法は高さ30cm、内径25cm、外径30cmである。供試体内空部とセル外部に2基ずつ計4基のレーザー変位計により供試体下端から10、20cmの供試体側方変位を計測しており、圧密・せん断中は供試体円周の8ヶ所を計測し、供試体半径を平均し算出している。供試体には軸力、トルク力、外圧、内圧をそれぞれ作用させており、主応力方向角 α_σ は鉛直軸と最大主応力 σ_1 のなす角を示し、中間主応力係数 b は三主応力状態における中間主応力 σ_2 の相対的な大きさを示し、 $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ の式で表される。

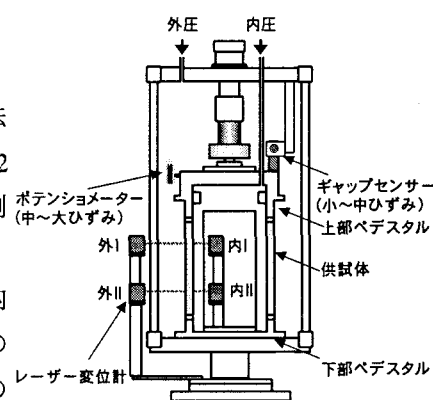


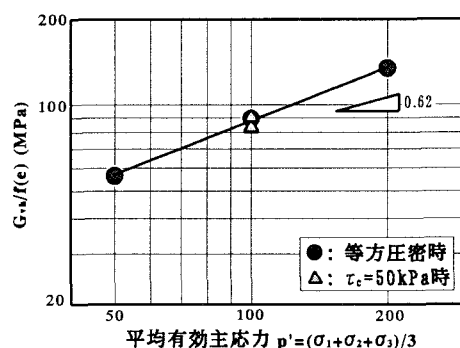
図1. 大型中空ねじりせん断試験機

3. 試料および試験条件

本研究に用いた試料は、豊浦砂(粒径 $75\mu\text{m}\sim 425\mu\text{m}$)を用い、相対密度80%を目標に空中落下法にて作製した。主応力方向の違いによる影響を把握する試験では、応力制御により平均有効主応力 $p'=100\text{kPa}$ まで等方圧密を行い、せん断過程はひずみ制御にて $b=0.5$ 、 $p'=100\text{kPa}$ を一定として主応力方向角 $\alpha_\sigma=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ のいずれかで固定し、ひずみ速度 $0.05\%/min$ で排水せん断を行い、種々のひずみレベルで繰返しせん断を行うことにより排水等価せん断剛性を求めている。 $p'=50, 100, 200\text{kPa}$ の3種類行い拘束圧の影響も調べた。主応力方向回転の履歴の影響を把握する試験では、 $p'=100\text{kPa}$ まで等方圧密を行い、 $\alpha_\sigma=0^\circ, 90^\circ$ 方向に p' 一定で軸差応力 $q=86.6\text{kPa}$ まで増加させた後、排水条件のもと q 一定、 $p'=100\text{kPa}$ 、 $b=0.5$ 一定で主応力方向のみを回転させた。試験は応力制御で行い α_σ を 2.5° ずつ回転させており、 $\alpha_\sigma=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ で等価せん断剛性を測定している。等価せん断剛性は、いずれの試験とも片振幅せん断ひずみ $\gamma_{2\theta}=10^{-4}$ を平均変位速度 0.025mm/min で与える小ひずみ繰返しせん断载荷を行った。

4. 試験結果

主応力方向固定試験について、図2に等方圧密時の排水せん断剛性率 $G_{vh}/f(e)$ 、 $\tau_c=50\text{kPa}$ を作用させ繰返し試験を行った際の $G_{vh}/f(e)$ と p' の関係を示す。 $f(e)=(2.17-e)^2/(1+e)^3$ によりせん断剛性率を正規化している。等方圧密時に $G_{vh}/f(e)$ は有効応力レベルに比例し大きく増加し、圧力レベル依存性を表わす乗数 n は 0.62 を示した。ひずみレベルが 10^{-6} 以下と考えられるベンダーエレメント試験では $n=0.45$ を示し¹⁾、ひずみレベルの違いにより n が変化することが考えられる。図3に α_σ

図2. $G_{vh}/f(e)$ と p' の関係

固定試験中およびその途中でいった繰返しせん断中のせん断応力比 τ/p' と $\gamma_{z\theta}$ の関係を示す。ここで τ は、ねじりせん断応力である。 α_σ の違いにより負のダイレイタンス発生時におけるせん断ひずみの値が異なっている。また繰返しせん断中、体積ひずみが収縮側に变化しており、塑性変形を起こしていることがわかる。図4に小ひずみ繰返しせん断を作用させる前の α_σ 固定試験中に発生した $\gamma_{z\theta}$ と、 $G_{vh}/f(e)$ の関係を示す。便宜上、等方圧密時における $G_{vh}/f(e)$ を $\gamma_{z\theta}=0.01\%$ の位置に示す。せん断初期 $G_{vh}/f(e)$ は一旦増加傾向を示し、その後低下している。三軸試験装置を用いたバンダーエレメント試験でも同様な傾向が認められている¹⁾。

応力方向回転中の各ひずみと α_σ の関係を図5に示す。鉛直方向ひずみ ε_z 、半径方向ひずみ ε_r 、円周方向ひずみ ε_θ 、ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ 、体積ひずみ ε_v 、軸差ひずみ γ で示している。 $\alpha_{\sigma 0}=0^\circ$ から回転試験を始めた場合、 α_σ 回転中各ひずみが大きく変化しており、 $\alpha_{\sigma 0}=90^\circ$ から回転試験を始めた場合、 α_σ 回転中ひずみ発生量が少ないことがわかる。これは、供試体作成時における土の異方性によるものと考察する。また、 ε_v が増加し続けるのは、応力誘導異方性が原因の一つである。これは、主応力方向が連続的に変化することにより、粒子配列構造が徐々に変化し、その結果として体積変化が生じたものと考えられる。図6に主応力方向回転による排水せん断剛性 $G_{vh}/f(e)$ の変化を示す。 $\alpha_{\sigma 0}=0^\circ$ から回転を開始した場合、 α_σ が 90° まで変化すると $G_{vh}/f(e)$ が低下し、 $\alpha_\sigma=90^\circ$ 以降、 $G_{vh}/f(e)$ の変化はすくなくなる。 $\alpha_{\sigma 0}=90^\circ$ からの場合、 $G_{vh}/f(e)$ は若干の増加を示した後、 $G_{vh}/f(e)$ の変化はあまりみられない。回転初期の応力状態によって、せん断剛性の変化傾向が異なる事がわかった。また、主応力方向固定試験 $\alpha_\sigma=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ における $\tau_c=50\text{kPa}$ の時の結果を示すと、 $\alpha_{\sigma 0}=0^\circ$ の開始時と同様に、ほぼ同じ傾向で低下していることがわかった。

5. まとめ

本研究では、主応力方向の異なる条件あるいは、主応力方向の回転の履歴をうけた供試体に対し、小ひずみの繰返しねじりせん断荷重を与え、せん断剛性の変化について検討した。 10^{-4} のひずみレベルに対する変形特性について行ったことより、① $n=0.62$ とやや高い応力状態依存性パラメータの値を示し、②主応力方向や主応力回転履歴にせん断剛性が依存することがわかった。

参考文献

- 1)山下聡・喜多川俊介・堀智仁・鈴木輝之:堆積構造と応力の異方性が砂質土の初期せん断剛性に及ぼす影響;土木学会論文集 No.694/Ⅲ-57,pp.319-329,2001.12
- 2)橋本聡・中村勇平・桑野二郎:豊浦砂の弾性的変形特性の異方性;土木学会第53回年次学術講演回pp.58-59,1998.10
- 3)Hardin, B.O. and Richart, F.E.(1963): Elastic wave velocities in granular soils; Proc. of ASCE, Vol.89,SM1,pp.33-65

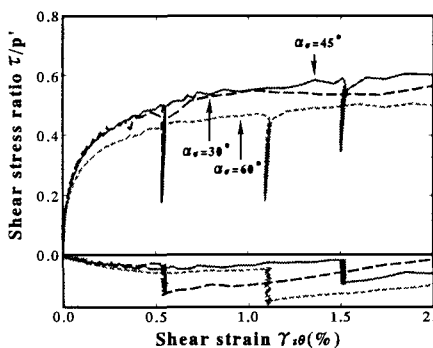


図3. 主応力方向固定試験におけるせん断応力比とせん断ひずみの関係

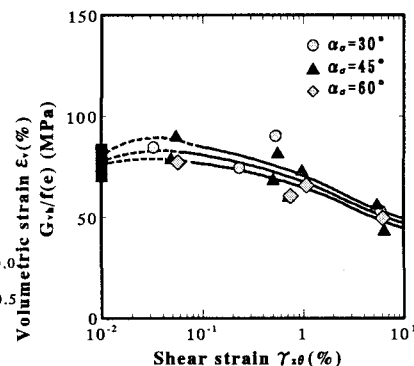


図4. α_σ 固定試験において発生した $\gamma_{z\theta}$ とその時の $G_{vh}/f(e)$ の関係

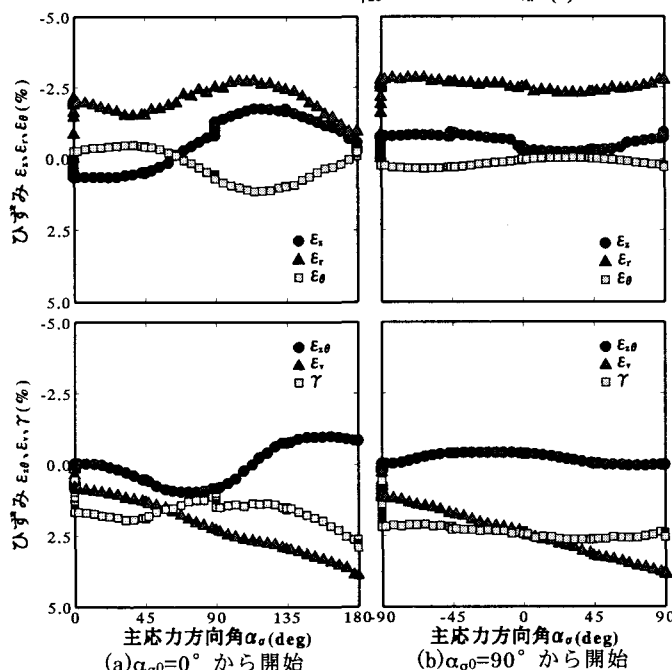


図5. 主応力方向回転中の各ひずみと α_σ の関係

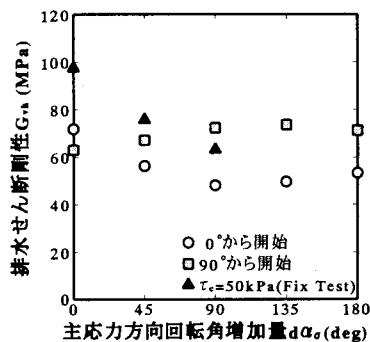


図6. 主応力方向回転角における $G_{vh}/f(e)$ の関係