

**$K_0$  圧密地盤の繰返しせん断特性に関する検討**

単純せん断試験 繰返しせん断  $K_0$  値

応用地質 正会員 ○三上武子  
東北学院大学 国際会員 吉田 望  
応用地質 正会員 大塚浩二

**1. はじめに**

地震時の地盤の地震応答解析では、実務では SHAKE に代表される等価線形化法が利用されることが多い。1995 年兵庫県南部地震以降、設計地震動が大きくなったことで対象とするひずみレベルも大きくなり SHAKE の適用性が議論されるようになった<sup>1)</sup>。これにともなって、繰返しせん断特性を求める試験法に対する要求も変化しつつある<sup>2)</sup>。

繰返しせん断特性は、繰返し三軸試験や繰返し中空ねじり試験を実施して測定される。水平成層地盤では、地震前は  $K_0$  応力状態にあるが、実務では原位置の土被り圧相当を拘束圧とした等方応力状態で繰返し載荷を行うことが多い。これは、平均主応力  $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_v)/3$  が一定であれば、 $K_0$  値 ( $=\sigma'_v/\sigma'_a$ ) が 0.5~1.0 の範囲において、せん断弾性係数  $G$  および履歴減衰率  $h$  とそのひずみ依存性は  $K_0$  値の影響をほとんど受けないとの試験結果<sup>3)</sup>に基づくものである。ここで言う  $G$ ,  $h$  とは、10 サイクル目の履歴曲線から算出されたものであり、図 1 に示すように履歴曲線の形状のみに着目したもので、原点からのずれ、すなわち応力履歴や残留ひずみは考慮されていない<sup>5)</sup>。 $K_0$  応力状態と等方応力状態では地震時の地盤の応答が異なるという報告<sup>6)</sup>もあることから、解析手法によっては初期応力状態の相違が解析結果に影響を及ぼす可能性もある。一方、地震時の応力・変形条件に目を向けると、せん断応力は水平方向に作用し、側方ひずみが発生しない単純せん断変形であることから、主応力を載荷して間接的にせん断応力を載荷する繰返し三軸試験よりは、水平面にせん断応力を直接載荷できる繰返し中空ねじり試験の方が、より原地盤の応力状態に近い試験である。ただし、側方変位は非拘束であるから側方ひずみが発生する。この問題を解決するため、非排水条件で鉛直変位を拘束し、体積ひずみ 0、鉛直ひずみ 0 として側方ひずみ 0 を満足させる方法も採用される。この実験は鉛直変位と側圧を拘束しているので、水の体積弾性係数が無限大という仮定に基づいている。しかし、側圧一定という条件は実地盤とは異なる。単純せん断変形を模擬するには、単純せん断試験機を用いるのが合理的と考えられる。しかし、この試験ではアルミリングやワイヤーで補強したゴムスリーブなどで供試体を覆うため、供試体に作用する側圧を制御するができず、初期応力状態を任意に設定することができない。このように、すべての条件を満足する万能なせん断試験法は、現在のところ存在しない。

筆者らは、初期応力状態の相違が地盤の地震応答に与える影響を考慮し、原地盤の挙動をより精度よく把握する目的で、供試体を通常のゴムスリーブで包み、側圧を制御する単純せん断試験を行う方法を考えた。前報<sup>7)</sup>では制御を簡易にするため、鉛直変位を拘束し、体積ひずみが生じないように側圧を制御することで単純せん断変形を模擬した。しかし、この方法では鉛直応力が変化することになり、原地盤とは異なっている。そこで、これを改善するために、鉛直ひずみの発生を許し、鉛直応力一定のもとで供試体の断面積が変化しないように側圧を制御する試験を行った。これにより、原地盤により近い応力・変形条件となる。ただし、通常のゴムスリーブを用いるため、供試体側面にせん断応力が作用せず、真の単純せん断試験ではないことに留意が必要である<sup>8)</sup>。

**2. 実験方法**

実験材料には、豊浦砂 ( $\rho_s=2.644\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_{dmin}=1.344\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_{dmax}=1.654\text{g/cm}^3$ ) を用いた。供試体サイズは直径 7cm×高さ 4cm の円柱形で、乾燥状態の豊浦砂を含水比  $w=5\%$  に調整した後、3 層突固め法により相対密度  $D_r=50\%$  に作製した。圧密条件は、軸方向応力  $\sigma'_a$  を  $100\text{kN/m}^2$  に統一して、 $K_0$  値を 1.0, 0.5, 0.35 の 3 種類に変化させた。また、載荷条件は単調載荷と繰返し載荷の 2 種類である。単調載荷は、せん断ひずみ速度  $0.1\%/min$  で  $\gamma=6\%$  まで載荷を行った。一方、繰返し載荷は、ひずみ振幅一定の三角波を 3 波ずつ載荷するステージ載荷で、

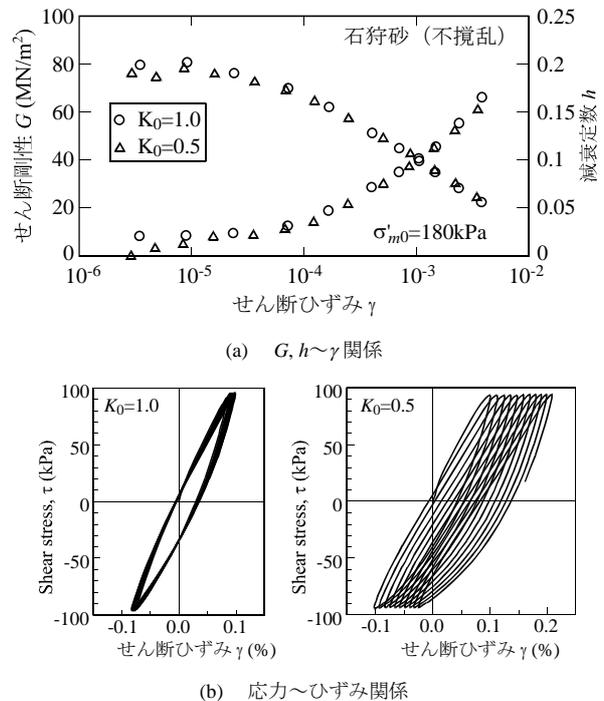


図 1 繰返しせん断特性に及ぼす初期応力状態の影響<sup>4)</sup>

Cyclic shear deformation characteristics of  $K_0$  consolidated soils by means of simple shear test

MIKAMI Takeko (OYO Corporation)  
YOSHIDA Nozomu (Tohoku Gakuin University)  
OTSUKA Koji (OYO Corporation)

ひずみ振幅は $\gamma=0.004\%$ ,  $0.04\%$ ,  $0.4\%$ ,  $0.8\%$ ,  $0.04\%$ の5種類とした。せん断ひずみ速度は単調載荷と同様に $0.1\%/min$ とした。これは、載荷周波数に換算すると $0.1\text{Hz}\sim 0.0005\text{Hz}$ となる。変形特性を求めるための試験法 (JGS 0542-2009, JGS 0543-2009) では、各ステージの初期応力状態を揃えるため、載荷中に発生した過剰間隙水圧を載荷後に消散させて次の載荷を行うように規定しているが、本実験では応力の変化を保持したまま次段階の載荷を行った。

### 3. 実験結果

応力～ひずみ関係を図2に示す。各ステージの1サイクル目の応力～ひずみ関係(履歴曲線)に着目すると、いずれの $K_0$ 値においてもStage3( $\gamma=0.04\%$ )までは単調載荷の応力～ひずみ関係(骨格曲線)と一致するが、それ以降のStage4( $\gamma=0.08\%$ )、Stage5( $\gamma=0.004\%$ )では応力が残留するため、履歴曲線が原点から上方にずれる。そのため、Stage2とStage5のひずみ振幅は等しいが、履歴曲線の位置は異なる。Stage3の1サイクル目の第1象限のみを抽出して図3に示す。等方応力である $K_0=1.0$ に比べて、 $K_0=0.5, 0.35$ では初期にせん断応力(軸差応力)が作用しているため、立ち上がり剛性(骨格曲線の傾き)が小さくなるのが観察される。一方、 $G, h\sim\gamma$ 関係に目を向けると、図4に示すように3サイクル目の履歴曲線から求めた $G$ に及ぼす $K_0$ 値の影響は、図3で見た立ち上がり剛性へ及ぼす影響ほど大きくない。

載荷にともなう $K_0$ 値の変化を図5に示す。単調載荷の $K_0$ 値の変化に着目すると(a)の $K_0=1.0$ では、載荷初期にいったん $K_0$ 値が減少した後、増加に転じる。一方、(b), (c)に示す $K_0=0.5, 0.35$ では載荷の進行とともに $K_0$ 値が増加する。いずれの初期条件においても、 $\gamma=6\%$ のとき $K_0=0.8$ 程度となるが収束には至らず、載荷の継続によって $K_0=1.0$ に漸近することが示唆される。単調載荷と繰返し載荷を比較すると、応力～ひずみ関係と同様にStage3( $\gamma=0.04\%$ )の1サイクル目までの $K_0$ 値の変化はほぼ一致しているが、 $K_0=1.0, 0.35$ の繰返し載荷では、その後 $K_0$ 値が大きく変化し、同じひずみに対して繰返し載荷の $K_0$ 値の変化が大きくなる。ただし、 $K_0=0.5$ ではそのような傾向は見られない。

### 4. まとめ

設計地震動が大きくなったことで対象とするひずみが大きくなり、より高度な解析手法が用いられるようになった。これにともない、試験法についても高精度化が求められるようになった。本報ではより原地盤に近い応力状態で繰返しせん断特性を求める試験法について検討した。今後さらに検討を続けて、合理的な試験法の開発につなげたいと考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関する研究委員会：大ひずみを考慮した地震応答解析手法、大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム発表論文集, pp.38-78, 2013.
- 2) 吉田他：時代の要請に応える土の繰返しせん断特性試験の確立を、地盤工学会誌, Vol.8, No.2, pp.1-5, 2010.
- 3) 山下他：初期応力状態の相違が砂の繰返し変形定数に及ぼす影響、地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.163-168, 1994.
- 5) 吉田望：地盤の地震応答解析、鹿島出版会, pp.59-89, 2010.
- 6) 吉田望：水平成層地盤の地震応答に与える初期せん断の影響、京都大学防災研究所年報, 第39号B-1, pp.23-35, 1996.
- 7) 三上他： $K_0$ 圧密地盤の繰返しせん断特性に関する予備的検討、第47回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.397-398, 2012.
- 8) 龍岡他：振動三軸試験と動的単純せん断試験による砂の液化強度、第15回土質工学研究発表会発表講演集, pp.569-572, 1980.

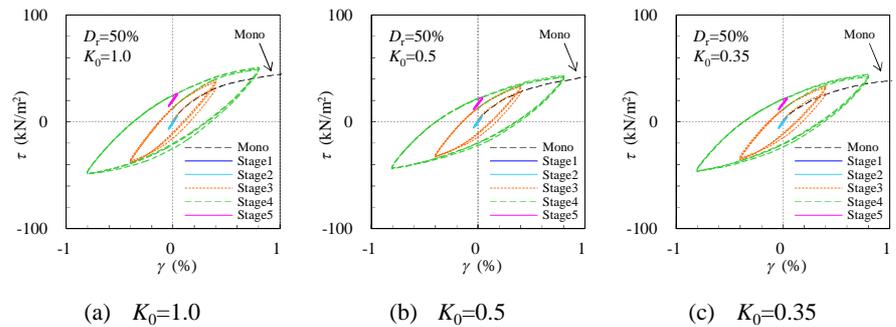


図2 応力～ひずみ関係

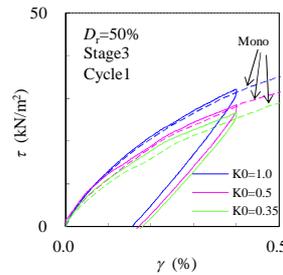


図3 骨格曲線に及ぼす $K_0$ 値の影響

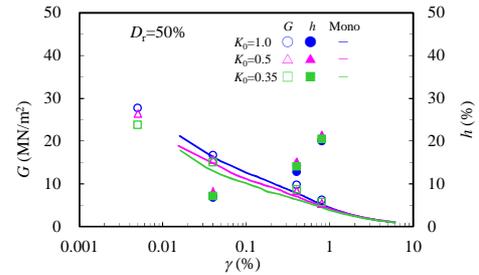


図4  $G, h\sim\gamma$  関係に及ぼす $K_0$ 値の影響

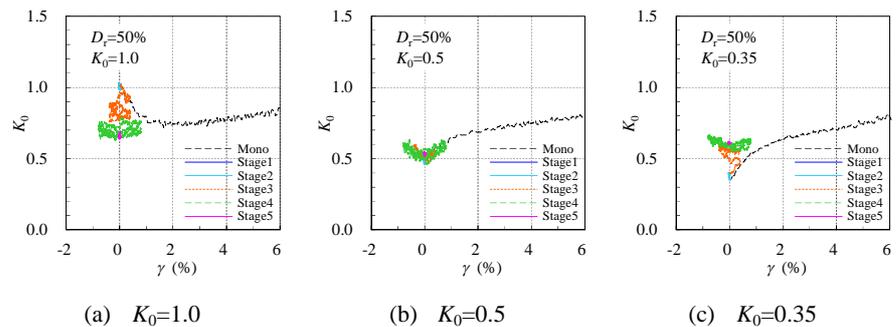


図5  $K_0$ 値の変化