

# 動的および静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数の応力状態誘導異方性

東京大学生産技術研究所 正会員○堤 千花 佐藤剛司 古関潤一

## 1. はじめに

室内試験において地盤材料の弾性変形係数を測定する方法として、供試体に微小な変形を与え、その応力ひずみ関係から求める静的な方法と、弾性波を入力し、その伝達速度を利用する動的な方法とがある。本稿では豊浦砂を用いて三軸試験を行い、「静的」および「動的」な計測手法によって求めた弾性変形係数の比較を行った。また応力状態誘導異方性が、ヤング率とせん断剛性の関係に与える影響について検討した。

## 2. 試験方法および動的・静的な弾性変形係数の算出法

気乾状態の豊浦砂（土粒子密度  $2.656 \text{ g/cm}^3$ ，最大間隙比 0.992，最小間隙比 0.632）で直径 5 cm，高さ 10 cm の円柱供試体を空中落下法により作成し，気乾状態のまま等方あるいは異方圧密した。試験装置にはひずみ制御による微小ひずみ繰返し载荷試験が可能な三軸試験機を用い，鉛直応力  $\sigma_v$  が 50, 100, 200, 400 kPa の各段階において，静的なヤング率を求めるための微小ひずみ繰返し载荷と，動的なヤング率およびせん断剛性を得るための圧電型小型アクチュエータによるキャップの微小加振<sup>1)</sup>を行った。試験は等方圧密で相対密度  $D_r$  が約 50 % (IC50)，等方圧密で  $D_r$  が約 80 % (IC80)，主応力比  $R = \sigma_v/\sigma_h$  が 2.0 の異方圧密で  $D_r$  が約 80 % (AC80) の計 3 ケースを実施した。

微小ひずみ繰返し载荷における典型的な応力ひずみ関係を図 1 に示す。各圧密段階において，この応力ひずみ関係を線形近似して得られた傾きを静的なヤング率  $E_s$  とした。動的ヤング率およびせん断剛性は，次式(1)，(2)により供試体の乾燥密度  $\rho_d$  と P 波および S 波速度  $V_p$ ， $V_s$  から求めた。

$$E = \rho_d V_p^2 \quad \dots (1), \quad G = \rho_d V_s^2 \quad \dots (2)$$

$V_p$ ， $V_s$  は上下一対の加速度計間の距離とその間の弾性波の伝播時間により算出され，伝播時間は図 2 のように，初めに到達した半波の立ち上がりが上下の加速度計の時刻歴に現れる時間差  $t_{rise}$  で定義した。

## 3. 試験結果

P 波加振により求めた動的ヤング率  $E_{pw}$  と静的なヤング率  $E_s$  の，鉛直応力に対する依存性を図 3 に示す。密度が同程度の供試体 IC80 と AC80 で得られた  $E_s$  は水平応力の違いによらず，ヤング率が応力状態誘導異方性を示すことが分かる。また，これらの  $E_s$  は密度の低い IC50 での  $E_s$  と比較して大きな値となっている。それに対し  $E_{pw}$  は供試体の密度の影響を受けにくく， $E_s$  の場合のような大きな値の違いは見られない。従って，供試体の密度が小さくなるほど動的なヤング率と静的なヤング率の差が大きくなり，密な供試体では動的なヤング率が静的な値より約 20 % 大きく，緩い供試体ではその差がさらに 60 % まで拡大する。この理由として，ある供試体の最も速い弾性波の伝播は土粒子のかみ合わせで最も硬い部分を通過することによって行われるため，動的な弾性変形係数は，供試体全体の微小な変形により得られた静的な値と比べて大きくなることが挙げられる。しかし，別途計測したベンダーエレメントによる弾性変形係数は本稿の動的計測値よりも顕著な密度依存性を示しており<sup>2)</sup>，計測手法により異なった傾向を示す可能性も考えられる。このような計測手法間での相違点をさらに明らかにするために，今後より詳細な検討が必要である。

図 4 には，同程度密度で圧密応力比の異なる試験ケース IC80 と AC80 で得られた S 波加振による動的せん断剛性  $G_{sw}$  の，三軸試験，弾性変形係数，弾性波速度，微小ひずみ繰返し载荷，応力状態誘導異方性

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 古関研究室 Tel 03-5452-6421

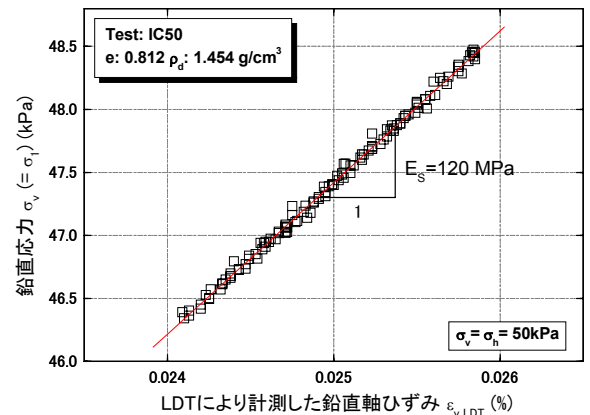


図 1 微小ひずみ繰返し载荷の応力ひずみ関係

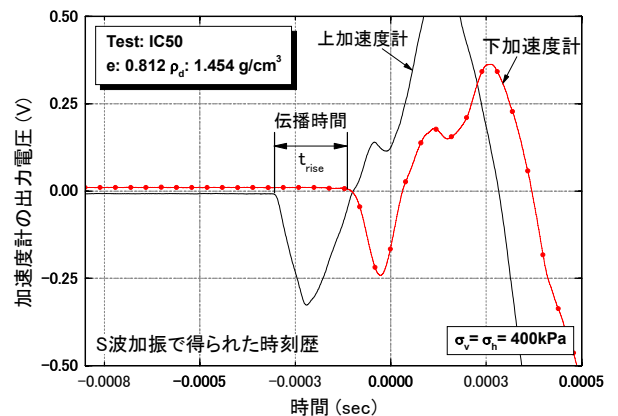


図 2 弾性波の伝播時間の定義

鉛直応力に対する依存性を示す。これによると同じ鉛直応力に対する  $G_{Sw}$  の値は等方圧密のケース IC80 の方が大きい。そこで横軸を鉛直・水平応力の相乗平均  $(\sigma_v \times \sigma_h)^{0.5}$  とした結果を図5に示す。IC80 と AC80 の  $G_{Sw}$  は同じ応力レベルではほぼ等しい値をとっていることから、せん断剛性はこの応力パラメータに依存し、その結果として応力状態誘導異方性を示すものと考えられる。従って例えば一般には等方弾性体として仮定した、式(3)を用いて行われる鉛直ヤング率  $E_v$  からせん断剛性  $G_{vh}$  への換算に、本来は異方性を考慮する必要がある。

$$G_{vh} = \frac{E_v}{2(1+\nu)} \quad \dots (3)$$

ここで  $\nu$  はポアソン比であり、以下では後述の  $\nu_0$  と同じ値を代入する。一方で、龍岡ら<sup>3)</sup>により提案されている、異方性を考慮できる換算式を次式(4)に示す。

$$G_{vh} = \frac{E_v}{2(1+\nu_0)} \frac{2(1-\nu_0)}{1+aR^n - 2\sqrt{a} \cdot R^{n/2} \cdot \nu_0} \quad \dots (4)$$

$\nu_0$  は基準ポアソン比(Hoque らによる豊浦砂の試験結果<sup>4)</sup>から 0.17),  $a$  は堆積方向などに起因する初期異方性の程度を示す係数(本稿ではこの異方性を無視し 1.0),  $n$  は  $E_v$  の応力依存性の程度を示す係数(静的計測結果に基づき 0.44),  $R$  は主応力比  $\sigma_v/\sigma_h$  である。なお、式(4)の異方性に関連する係数  $a$  と  $R$  に 1.0 を代入すると等方弾性体の式(3)が得られる。

IC80 と AC80 で求めた  $E_{pw}$  と  $E_s$  を式(3)あるいは式(4)でせん断剛性に換算した  $G_{pw}$  および  $G_s$  を図5に示す。前述の  $G_{Sw}$  を指標とし、図5で  $E_{pw}$  の式(3)による換算値  $G_{pw\_Eq.(3)}$  に着目すると、IC80 で得られた値は  $G_{Sw}$  とほぼ等しいのに対し、AC80 で得られた値は他の動的な計測結果との差が大きい。しかし AC80 の  $E_{pw}$  の換算に式(4)を用いた場合には異方圧密による応力異方性が考慮されるため、その換算値  $G_{pw\_Eq.(4)}$  が他の動的計測結果とほぼ一致することが分かる。これは静的な計測結果についても同様であり、AC80 の  $E_s$  は式(3)のかわりに式(4)を用いて換算することで、IC80 において求めた  $G_s$  と値がほぼ等しくなる。このことは、異なる平面上で定義した弾性変形係数の比較検討の際に応力状態誘導異方性を考慮することの重要性を示唆している。

#### 4. まとめ

- ・P 波加振により求めた動的なヤング率は静的に求めた値よりも大きく、供試体の密度が小さくなるほどその違いは大きくなった。
- ・ヤング率からせん断剛性への換算に応力状態誘導異方性を考慮することにより、S 波加振により直接求めたせん断剛性と、P 波加振および静的な方法で求めたヤング率からの換算値は、同一の鉛直・水平応力レベルではほぼ一致した。

<参考文献> 1) 橋口ら(2002): 三軸供試体側面での加速度計測を利用した弾性波速度測定システムの開発, 第57回土木学会第3部門。2) 堤ら(2005): 動的および静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数の比較, 第40回地盤工学会。3) Tatsuoka, F. et al., (1999): Non-linear resilient behavior of unbound granular materials predicted by the cross-anisotropic hypo-quasi-elasticity model, Unbound Granular Materials, Balkema, pp. 197-204。4) Hoque, E. and Tatsuoka F. (1998): Anisotropy in the elastic deformation of materials, Soils and Foundations, 38-1, pp. 163-179。

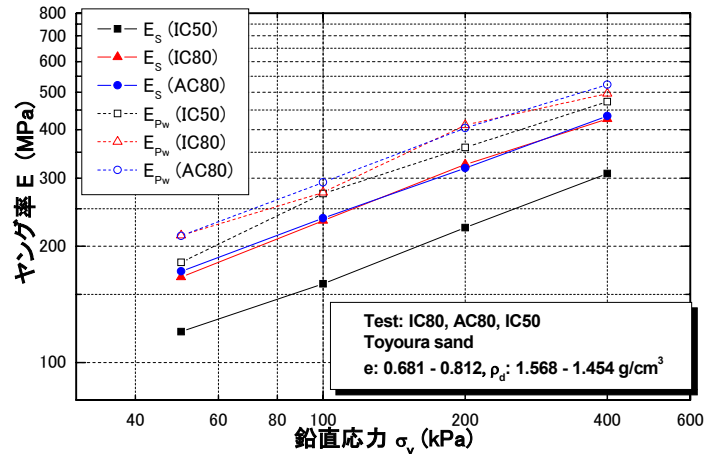


図3 動的および静的に求めたヤング率の比較

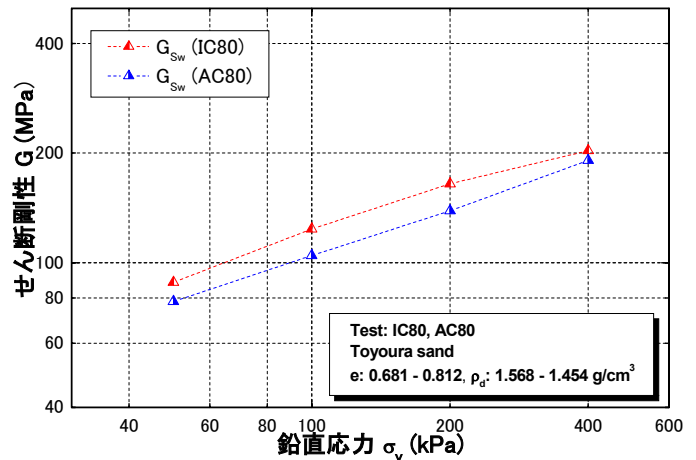


図4 せん断剛性の鉛直応力への依存性

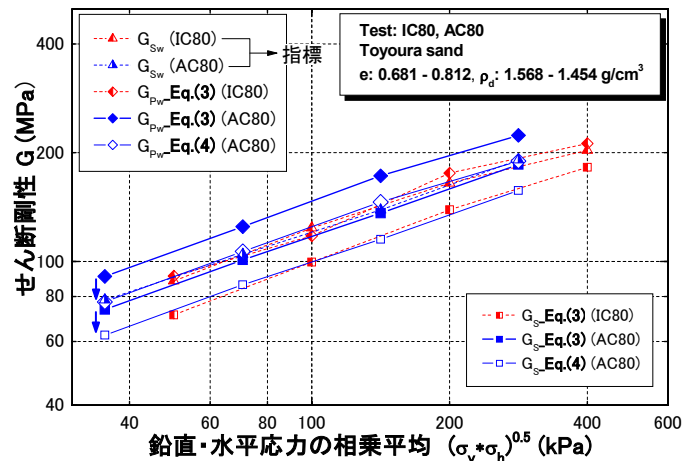


図5 応力状態誘導異方性の考慮の有無の影響