

# 低拘束圧条件における砂のせん断弾性係数の計測

地盤工学研究室 LE ANH TUAN  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

従来、地盤の動的問題に関する模型実験では、土の弾性係数が上載圧(拘束圧)の0.5乗に比例する( $G = Ap'^{0.5}$ )相似則が用いられる<sup>1),2)</sup>(以降、0.5乗則と称する)。

$$G = Ap'^{0.5}$$

ここで、 $G$  : せん断弾性係数 (kPa)

$A$  : 任意係数

$p'$  : 有効拘束圧 (kPa)

これは実験式であり、通常三軸試験で50kPa(土かぶりに直すと5m)以上の拘束圧下で得られた結果であるが、それ以下の拘束圧では、実験精度を上げることが困難であるため、低拘束圧条件下での測定データが少ない現状にある。

一般的に、模型実験のサイズは実物に近いほどよいとされるが、模型試験のサイズは、場所の問題、予算等の制約条件を受ける。例えば、写真1に示すような土槽を用いた基礎の振動試験において、1/20の縮尺で実験を行ったが、起振機の振動で土槽自体が振動してしまい、正確な振動伝播特性を把握するには至らなかった。そこで、1/100模型とすることで、起振機の振動が土槽に与える影響を小さくした<sup>3)</sup>。このように、実物と離れた縮尺にすることは、低拘束圧下においても、土の特性に変化がないことを示しておく必要がある。

そこで本研究では、模型実験で低拘束圧条件下において、土のせん断波速度を計測し、せん断弾性係数 $G$ を求める。この結果より、地盤の動的問題に係るせん断弾性係数と有効拘束圧の関係が低

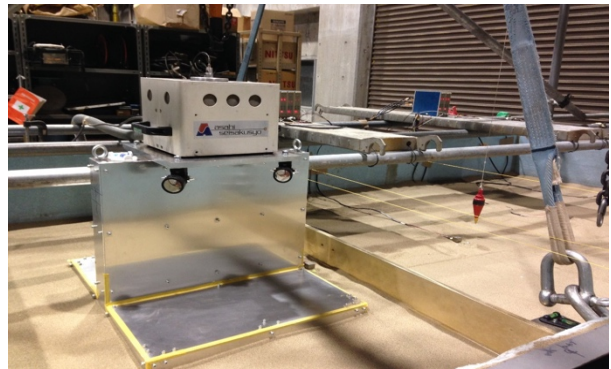


写真-1 1/20スケールの模型土槽

拘束圧条件下でも適用が可能かどうかを検討する。

## 2. せん断弾性係数 $G$

せん断弾性係数 $G$ はせん断応力とせん断ひずみの比で定義される。これはせん断力による変形のしにくさを表す物性値である。一方で、土のせん断弾性係数 $G$ はせん断波速度 $V_s$ と密度 $\rho$ より式(1)より算出することができる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

ここで、 $G$  : せん断弾性係数 (kPa)

$\rho$  : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_s$  : せん断波速度 (m/s)

## 3. $V_s$ の測定方法

本研究では、下記の3種類の方法で土のせん断波速度 $V_s$ を測定し、 $G$ を求める。

### 3.1 板叩き法

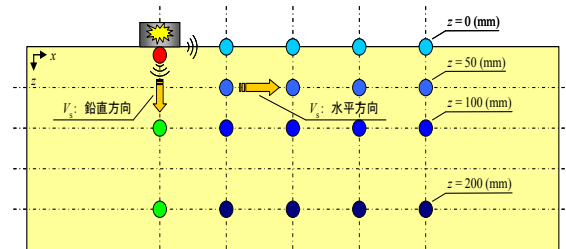
板叩き法では、図-1に示すように、土槽の表面に金属版を設置し、錘を衝突させ振動を起こす。金属版からの振動が左から右の加速度計に到達する時間を波の立ち上がりで計測する。対とした加速度

計の到達時間の差と距離が分かればせん断波速度  $V_s$  を計算できる。

図-2 に板叩き法による  $G$  を計測した結果を示す。この結果によりせん断弾性係数と拘束圧の関係は、

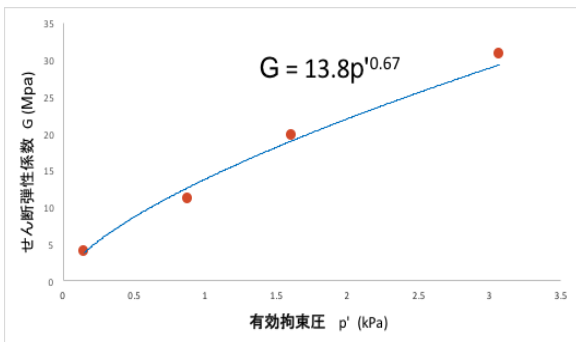
$$G = 13.8p'^{0.67}$$

になり、 $G$  の 0.5 乗則 ( $G=Ap'^{0.5}$ ) より乗数が大きい結果となることがわかる。



伝播距離の算出方法 (今回は水平距離とした)

図-1 板叩き法の概要



有効拘束圧とせん断弾性係数の関係

図-2 板叩き法による測定結果

### 3.2 三軸ベンダーエレメント試験

ベンダーエレメント (BE) とは厚み方向に分極された圧電素子である。この構造の BE に電圧を印加させると上部の圧電素子は縮み、下部の圧電素子は伸びる。また、変形を与えると電圧を発生させる特性も有している。波の伝播距離は、基準で定められている BE 先端間距離 (図-3) を利用する。これと BE で測定した伝播時間でせん断波速度  $V_s$  を計算する<sup>4),5)</sup>。

本実験では表-1 に示す拘束圧状態のもとで  $V_s$  の測定を行った。なお、無拘束圧状態で測定するケースは、供試体を自立させるため負圧法で使用するモールドを装着したまま実験を行った。

表-1 三軸 BE 試験条件

試料	圧力
小名浜砂 ( $\rho=1.5\text{g/cm}^3$ )	0→10→20→50→100→200 →300→400→500→600 kPa

三軸 BE 試験で  $G$  を計測した結果を図-4 に示す。この結果によりせん断弾性係数と拘束圧の関係は

$$G = 7.2p'^{0.46}$$

になる。この結果は 0.5 乗則 ( $G=Ap'^{0.5}$ ) に近い結果となっていることがわかる。

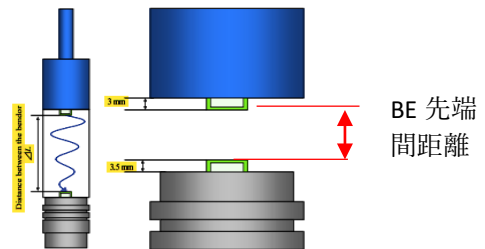
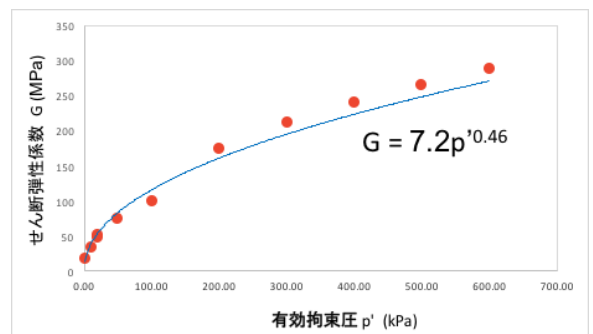


図-3 三軸ベンダーエレメント



有効拘束圧とせん断弾性係数の関係

図-4 三軸 BE 試験による測定結果

### 3.3 土槽ベンダーエレメント試験

本実験（図-5）は、実験土槽内に BE 先端間距離を任意に変更できるアルミフレームに固定した BE を用いて、3 種類の距離（5cm, 10cm, 20cm）で、土被り 5 から 45cm に変化させて  $V_s$  の測定を行った。

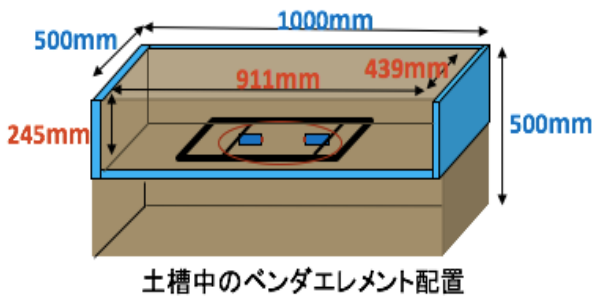


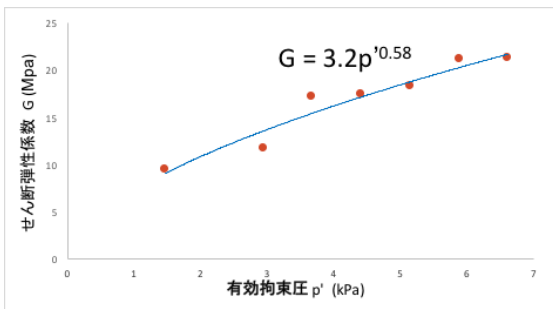
図-5 試験模式図

表-2. 土槽 BE 試験条件

試料	BE 距離	土被り
小名浜砂 ( $\rho=1.5\text{g/cm}^3$ )	5, 10, 20cm	5-10-20-25-30-35-40-45cm

なお、本実験では BE 距離 5cm, 土被り 10-20-25-30-35-40-45cm の条件のみでデータを取得できた。BE 間距離が大きい場合（10cm, 20cm）と土かぶりが小さい場合（5cm）は、波を感知することは出来なかった。

土槽 BE 試験で得られた試験結果を図-6 に示す。結果よりせん断弾性係数と拘束圧の関係は  $G = 5.7p^{0.58}$  となった。この結果は 0.5 乗則 ( $G=Ap^{0.5}$ ) に近い結果となっていることがわかる。



有効拘束圧とせん断弾性係数の関係

図-6 土槽 BE 試験による測定結果

### 4. 全ケースの結果比較

全ケースの  $G$  を比較した結果を図-7（板叩き法：三角印，土槽 BE 法：丸印，三軸 BE 法：四角印）にまとめた。

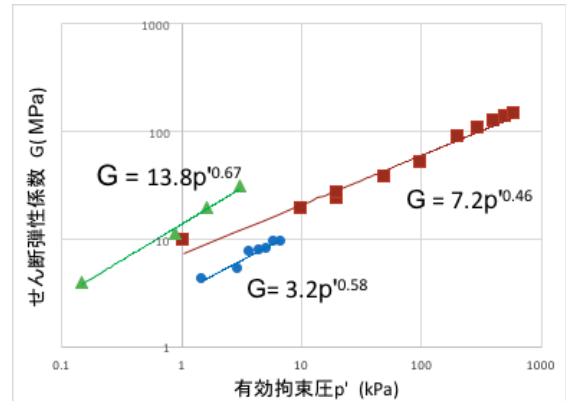


図-7 全試験結果

この結果を見ると、板叩き法の値が大きく傾きが急であることが分かる。一方で、三軸 BE と土槽 BE の傾きは 0.5 乗則に近いが、土槽 BE の値が三軸 BE に比べて小さい。そこで、BE 試験に関して結果の整理方法を再検討してみる。

伝達距離の算定で用いている BE 先端間距離（図-3）のかわりに、図-8 に示すように BE 根元間距離として再計算を行った。なお、三軸 BE でモールドを用いたケースについても、波がモールドを伝わった可能性があるため、信頼性の面から除外した。

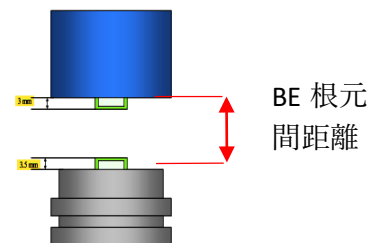


図-8 BE 根元距離

図-7 を再計算した結果を図-9 に示す。拘束圧 10kPa より小さい値は土槽 BE より得られた結果、拘束圧 10kPa 以上は三軸

BE から得られた結果である。図より、ほぼ連続的な関係が得られていることがわかる。また、せん断弾性係数と拘束圧の関係は  $G = 4.9p'^{0.54}$  となり、0.5 乗則 ( $G=Ap'^{0.5}$ ) に近い結果となっていることがわかる。

今回は、BE 根元間距離を用いた方が三軸 BE と土槽 BE でよい一致を得た。土槽 BE では BE 間が 5cm という短い距離でしか測定できなかったため、BE 長さの影響を大きく受ける。今後、BE 長さの影響を小さくするために、長い伝達距離でも測定できる手法を検討する必要がある。

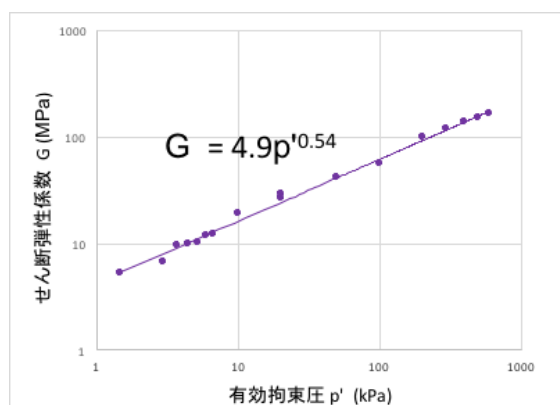


図-9 BE 距離修正後の結果

## 5. まとめ

本実験では、低拘束圧条件下における土のせん断弾性係数を計測して、次のことが確認できた。

- 1) 土槽 BE 試験では、土かぶり 10cm 以上、BE 間距離 5cm 以内でデータを得ることが出来た。
- 2) 板叩き法では、0.5 乗則や他の手法と比べて大きな値を示した。水平方向を伝達距離としたが、起振源から斜め方向に伝わる波もあることから、伝達距離の算定に問題があると思われる。

- 3) 三軸 BE 法と土槽 BE 法では、ほぼ 0.5 乗則に従うことがわかった。しかしながら、土槽 BE 法から得られた G は三軸 BE 法から得られた G より小さい。
- 4) 波の伝達距離を BE 根元間距離とすることにより、三軸 BE 法と土槽 BE 法の G を近づけることが出来た。

以上より、低拘束圧下においても G の 0.5 乗則は成立すると考えられる。

## 参考文献

- 1) 香川崇章: 土木構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文集, No. 275, pp. 69-77, 1978.
- 2) 國生剛治, 岩楯徹広: 軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文集, No. 285, pp. 57-67, 1979.
- 3) 豊田 浩史: 模型地盤内の振動伝達機構に関する基礎試験 (The element test on oscillation transfer mechanism in the ground), pp. 1-84, 2013.
- 4) International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements Organized by TC-29
- 5) 地盤工学会基準: ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法