

ベンダーエレメントを用いた土槽模型地盤のせん断剛性測定

長岡技術科学大学大学院 ○ NGUYEN VAN THINH
 長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田 浩史
 長岡技術科学大学大学院 正会員 高田 晋
 長岡技術科学大学大学院 正会員 三上 和久

1. はじめに

地盤に関する力学的挙動を観測するためには、実物を構築して実施することが望ましいが、多大な労力と費用を要することから、小型の模型を作製して実験を実施することが一般的である。三軸圧縮試験では供試体に約20kPaの拘束圧を載荷し試験を行ったが、今回の模型地盤は小さいため、さらに低拘束圧条件となる。地盤の振動問題に関する設計・解析等では、せん断剛性は重要なファクターとされている。本研究では比較的小型の土槽を用いた低拘束圧条件下において、ベンダーエレメント (BE) 試験を実施して、せん断波速度からせん断剛性を求めた。

過去の研究では、三軸試験結果より、せん断剛性 G は模型サイズの $1/2$ 乗に比例する実験則^{1) 2) 3)}を適用すべきであることが指摘されている。ただし、通常の三軸試験の拘束圧は、土被りにすると 2m 以上の拘束圧条件となっている。そこで、小型土槽実験のように、土被りの浅い模型地盤でも、この実験則が成立するかを確認する。BE 試験より得られたせん断波速度 V_s より、せん断剛性 G ($G = \rho V_s^2$) を求め、 G は上載圧 (土被り圧) の $1/2$ 乗に比例することを調べる (ここでは、 G の $1/2$ 乗則と称する)。模型地盤において、BE 試験よりせん断波速度 V_s の測定を行い、数 cm の土被り厚さでも $1/2$ 乗則が成り立つかを確認し、せん断剛性測定手法としての妥当性を示すことが本研究の目的である。

2. 試験方法

2. 1 試験条件

本研究では小名浜砂を試料として小型土槽に入れて、せん断波を入力し伝播時間を測定する。BE 間距離は 5cm とし、測定した伝播時間からせん断波速度 V_s を計算する。求めたせん断波速度 V_s からせん断剛性 G を求めた。せん断波の伝播速度 V_s とせん断剛性 G は次式より算出した。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t}$$

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

V_s : せん断波速度 (m/s)

L : 伝播距離 (cm)

Δt : 伝播時間 (s)

G : せん断剛性 (MPa)

ρ : せん断波土の密度 (g/cm^3)

使用した試料の小名浜砂については図-1 に粒径加積曲線、表-1 に物理特性を示す。

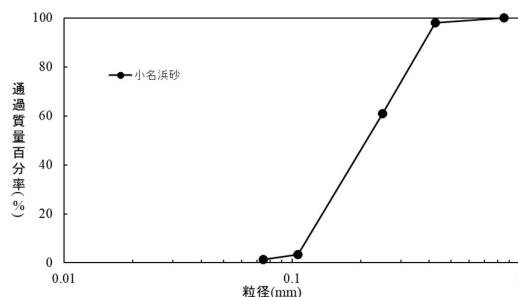


図-1 小名浜砂の粒径加積曲線

	小名浜砂
最大間隙比 e_{\max}	1.007
最小間隙比 e_{\min}	0.645
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.684
相対密度 D_r (%)	30, 60, 80

表-1 小名浜砂の物理特性

2. 2 試験装置

図-2 は、本研究で使用した試験土槽であり、サイズは奥行 100cm、幅 50cm、高さ 50cm である。図-3 は、使用した BE 素子であり、寸法は幅 12mm、高さ 3mm、厚さ 12mm である。図-4 は、地盤作製時に使用した 0.85mm ふるいである。図-5 に BE 計測に用いた使用機器の構成図を示す。

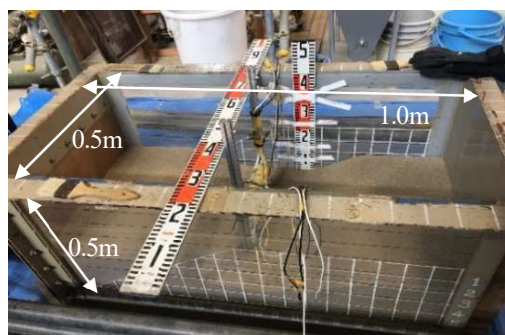


図-2 試験土槽

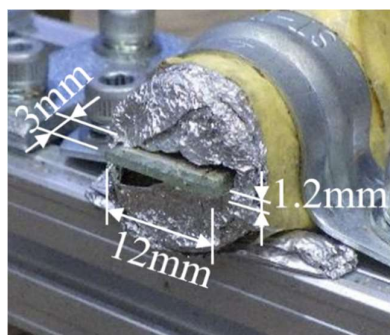


図-3 ベンダーエレメント素子

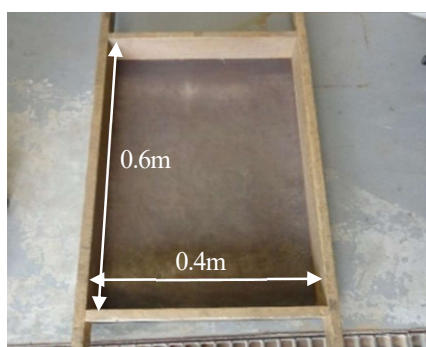


図-4 0.85mm ふるい

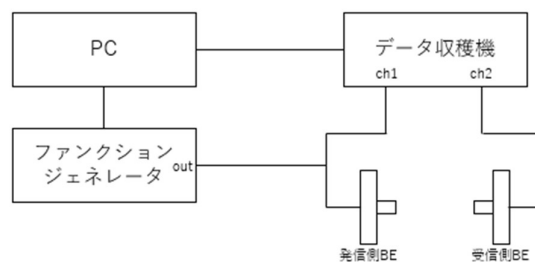


図-5 BE 計測構成図

BE は発振部と受信部から構成されて、発振部が振動することでせん断波を発生させながら受信部でその波を受け取る。伝播時間と BE 間距離が分かれば、せん断波速度 V_s が計算可能となる。実験にあたっては地盤工学会基準の試験方法 JGS 0544/2011 「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」⁴⁾ を参考にした。



図-6 BE 間距離

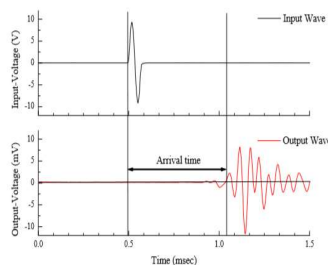


図-7 波の伝播時間

波形	sin 波
波数	1 波
発信電圧(V)	±10
測定周波数(kHz)	15

表-2 発信波条件

図-6 に BE 試験における BE 間距離、図-7 に波の伝播時間の推定方法をそれぞれ示した。波の伝播距離は、tip-to-tip 法より、BE の先端間距離 (5cm) とした。伝播時間は、発信波と受信波の立ち上がり点の時間幅とする。発信波条件は 15kHz の正弦波 1 波とした (表-2)。BE を固定したアルミフレームを 3 パターン (水平・斜め 45 度・鉛直) について試験を行い比較した。波の伝播の方向より、水平伝播、斜め 45 度伝播、鉛直伝播と記述する。BE は、小型土槽底部から約 5cm の高さに配置し、土被りが 5cm、10cm、15cm、20cm、25cm、30cm となるよう埋設した。

本試験では、1 層 (奥行 100cm、幅 50cm、高さ 5cm) ごとに砂を入れていき、BE 試験を実施する。土被りが 30cm (6 層) となるまで同様の試験を行う。Dr30%では、砂を落下高 0cm でゆっくりと堆積させることで地盤を

作製した（1層あたり 35kg の砂）． $Dr60\%$ では 1 層に 37.5kg の砂を高さ 50cm から 0.85mm ふるいをを用い，空中落下法で地盤を作製した． $Dr80\%$ も同様の方法で，1 層に 39.1kg の砂を，高さ 60cm から堆積させた．

3. 試験結果

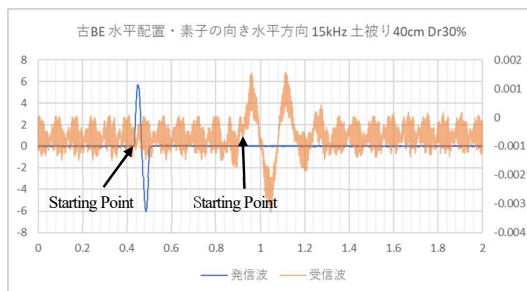


図-8 発信波と受信波

I_s 算出例：
 $I_s = 50 \{mm\} / (0.919 - 0.433) \{msec\}$
 $= 102.88 \{m/sec\}$

図-8 に示すように，発信波と受信波をグラフで整理し，それぞれの Starting Point から，せん断波速度及びせん断剛性を算出した．

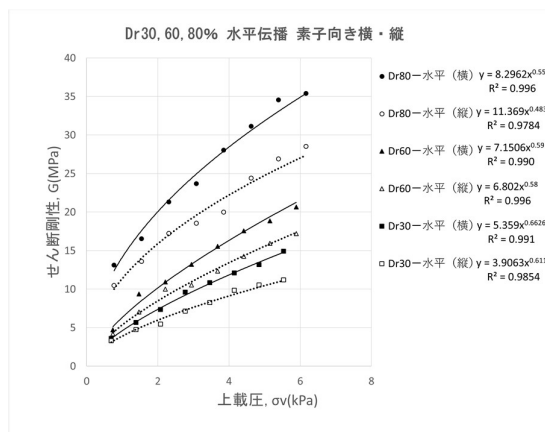


図-9 せん断剛性・上載圧の関係

図-9 に，水平伝播のせん断剛性と上載圧の関係を示す．上載圧が大きくなるとせん断剛性も大きくなる傾向があり，また相対密度が高ければ高いほどせん断剛性も大きくなることを確認した．各ケースの近似式では $1/2$ 乗則に近い結果となることが分かる．同図には，BE の素子を横向き・縦向きに設置したケースも示してある．BE 素子縦向きよりも横向きの方が，大きいせん断剛性を示した．この結果から BE 素子の設置向きにより，測定されたせん断剛性に違いが生じることが分かった．これは，地盤中の上載圧と側圧の違いが関係していると思われる．

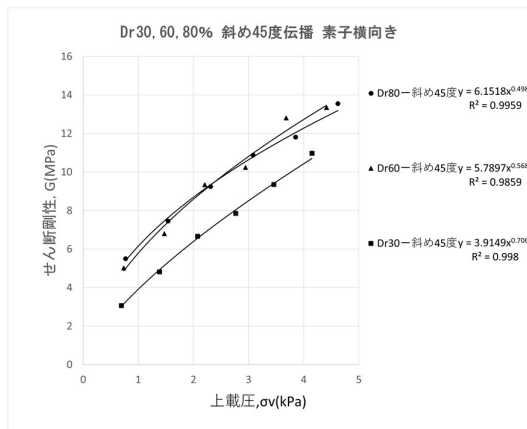


図-10 せん断剛性・上載圧の関係

図-10 に、斜め 45 度伝播のせん断剛性と上載圧の関係を示す。相対密度が大きくなるとせん断剛性も大きくなるが、 $Dr_{80\%}$ と $Dr_{60\%}$ のせん断剛性にほとんど差が見られなかった。この理由については今後の検討課題である。また、せん断剛性の近似式では 1/2 乗則に近い結果となることを確認した。

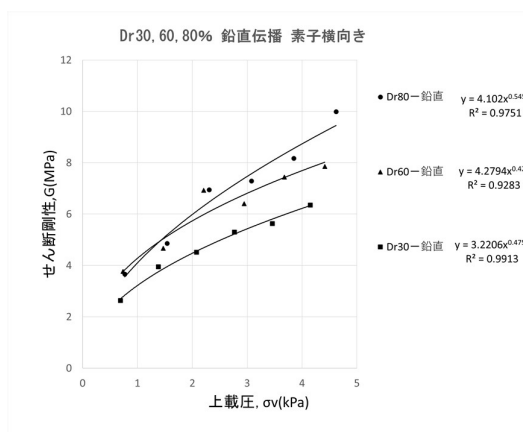


図-11 せん断剛性・上載圧の関係

図-11 に、鉛直伝播のせん断剛性と上載圧の関係を示す。鉛直伝播においても、せん断剛性は 1/2 乗則に近い結果を示したが、 $Dr_{80\%}$ と $Dr_{60\%}$ のせん断剛性の差は明確ではない。また、水平伝播・斜め 45 度伝播と比べ、せん断剛性の値は最も小さくなった。

4. 結論

本研究では地盤振動問題に関する土槽模型地盤のせん断剛性を測定するためベンダーエレメント試験を行い、以下の結果が得られた。

- 超低上載圧条件下において、相対密度 Dr の増大に伴いせん断剛性が大きくなることを示したが、斜め 45 度伝播・鉛直伝播では $Dr_{60\%}$ と $Dr_{80\%}$ において大きな差異が見られなかった。
- 超低上載圧条件下において、せん断波剛性の 1/2 乗則が適用可能であることを示した。
- 水平伝播においては、BE 素子向きの違いよりせん断剛性の測定結果に違いが生じた。素子横向きが縦向きより大きな値を示した。

参考文献

- 1) 香川崇章：土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) Iai, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil- Structure- Fluid Model in 1g Gravitational Field, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.105-118, 1989.
- 4) 地盤工学会：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，地盤工学会基準（JGS 0544），2011.