

地盤のせん断波速度に与える波の振動および進行方向の土圧の影響

地盤工学研究室 NGUYEN VAN THINH
指導教員 豊田 浩史

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。地盤の振動問題に関する設計・解析等では、せん断波速度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上載圧の小さい条件下において、砂を堆積させて、ベンダーエレメント(BE)試験を実施した。また、一对の BE 素子が一直線上に設置しやすいように、アルミ製フレーム枠を用いて固定した。BE 素子の向きが水平と鉛直の場合、波の振動方向は、それぞれ鉛直と水平になる。また、せん断波速度には波の振動方向と進行方向の応力が影響することがわかっているため、鉛直方向の土圧と水平方向の土圧の測定も行った。このように、小型土槽において、上載圧が小さい条件下において、せん断波速度に与える波の振動・進行方向の土圧が与える影響について検討を行った。本手法の、整合性を確認するため、BE 発信・加速度計受信試験及び板叩き試験も実施した。

2. 試験方法

2.1 模型地盤

実験で使用した地盤材料は小名浜砂である。相対密度は、比較的容易に均一な模型地盤が作製可能な $Dr = 60\%$ とした。小名浜砂の物理特性は、土粒子の密度 $\rho_s : 2.684(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、最大間隙比 $e_{max} : 1.007$ 、最小間隙比 $e_{min} : 0.645$ 、最大粒径 : 0.85mm である。地盤材料は模型実験の使用状態として気乾燥状態 $w_i \approx 0\%$ とした。本研究で使用した試験土槽のサイズは奥行 1000mm 、幅 500mm 、高さ 500mm である。

模型地盤は 0.85mm ふるいを用いて落下高さ 500mm の空中落下法により作成した。密度管

理は層厚 50mm ごとに相対密度 $Dr = 60\%$ となるように所定の重量を土槽に堆積させることで地盤を作製した。

2.2 試験条件

2.2.1 BE 試験

BE は発信部と受信部から構成されて、発信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機能を持っている。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。¹⁾

$$V_s = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (1)$$

V_s : せん断波速度 (m/s)
 ΔL : 伝播距離 (mm)
 Δt : 伝播時間 (msec)

BE 計算条件は発信波の周波数を 15kHz の正弦波 1 波、発信電圧は $\pm 10\text{V}$ とした。BE 間距離は十分大きい受信波が得られた 50mm とした。また、BE の素子寸法は幅 12mm 、高さ 3mm 、厚さ 1.2mm である。基準に従い、波の伝播距離 ΔL (mm) は、tip-to-tip 法²⁾ (BE の先端間距離) にて推定し、波の到達時間 Δt (msec) は、start-to-start 法³⁾ (発信波と受信波の立ち上がり点) を用いて、せん断波速度 V_s (m/s) を算出した。発信波条件は 5kHz 、 10kHz 、 15kHz の正弦波 1 波とした (表-1)。データ整理する際に周波数 15kHz を主な周波数として、せん断波速度を算出した。

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

表-1 発信波条件

BE 設置の精度向上のため、アルミ製のフレーム枠に BE を固定し、水準器、レーザー等を用いて、水平となるように慎重に埋設した。また、計測の際に、受信電圧が非常に小さく、またドリフトを起こしやすいので、受信波に対するノイズ除去とゼロ電位の維持に努めている。

ここで、アルミ製のフレーム枠には、BE 素子の向きを水平と鉛直としたものを固定している。また、受信側の BE を固定しているフレームは可動式であり、50mm の BE 素子先端間距離を正確に設置できる構造である。今回の実験は BE 自体を水平に配置して（三軸試験では通常鉛直に配置）、BE 素子の向きが変わることにより、せん断波速度への影響を調べた。図-1 に土圧と波の振動方向の関係を示す。

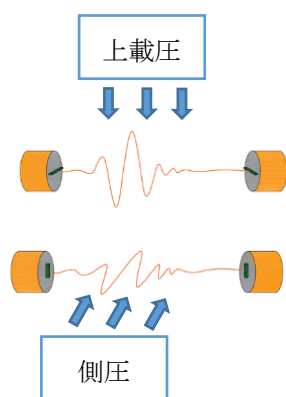


図-1 波の振動方向と土圧の関係図

BE 素子が水平の時、波は上載圧方向と同じ上下（鉛直）方向に振動し、BE 素子が鉛直の時、波は側圧方向と同じ左右（水平）方向に振動する。そこで、波の振動方向が鉛直の場合は上載圧が関係しており、波の振動方向が水平の場合は水平土圧が関係すると考えられる。そこで、土槽中央の底盤には鉛直土圧、土槽中央には水平土圧を計測する直径 50mm の土圧計を固定配置して、土槽内の応力状態を確認した。

2.2.2 BE 発信・加速度計受信試験

本手法では、発振には BE を、波を受ける側は BE ではなく、圧電型加速度計を使用した。圧電型加速度計とは、物体の振動または物体

の運動の加速度を測定できる装置である。振動が引き起こされる力により、または運動の変化（加速度）より引き起こされる力により、その圧電体に印加された力に比例した電荷が生じる。この電荷は力に比例するが、質量が一定なので電荷は加速度に比例することになる。

発信側の制御システムは BE 試験と同じであるが、受信側の加速度測定は異なる計測器を使用した。相対密度 $D_r = 60\%$ の小名浜砂を堆積させ、BE 素子の向きを水平とし（波の振動方向が鉛直）、ベンダーエレメント (BE)・加速度試験を実施した。

試験では、リオン株式会社製の「一成分型圧電型加速度ピックアップ PV-87」を用いた。PV-87 は設置面に対して鉛直方向 (Z 方向) のみしか測れないが、分解能が高いという特徴がある。波の振動方向が鉛直となることより、鉛直加速度が測定できるように設置した。BE 素子先端と加速度計の間隔をせん断波伝達距離 ΔL とし、 Δt は、“start-to-start” 法³⁾を用いて波形記録から同定した。式 (1) によりせん断波速度を算出可能である。

2.2.3 板叩き試験

板叩き試験は地盤上に木の板を置き、板の左右を水平に打撃し、S 波を発生させる。受信側は 1 軸加速度計を用いて波の加速度を測定する方法である。伝播距離が大きく、1 回の試験で地表からある程度の深度まで測定できる特徴がある。

板叩き試験は、BE 試験同様空中落下法より相対密度 $D_r = 60\%$ の地盤で行った。土被りの 10mm 当たりに加速度計の感度方向を波の振動方向と合わせて埋設し、400mm まで 5 つの加速度計を設置した。地表面に板を置いて、24g の重りで板を横向きに叩いた（振り子打撃）。波は地表面から横に振動しながら下に進む。この時、各加速度計で波の加速度を測定し、波の立ち上がり間隔から、伝播時間を読みとり、式 (1) によりせん断波速度を算出した。

3. 試験結果および考察

3.1 BE 試験

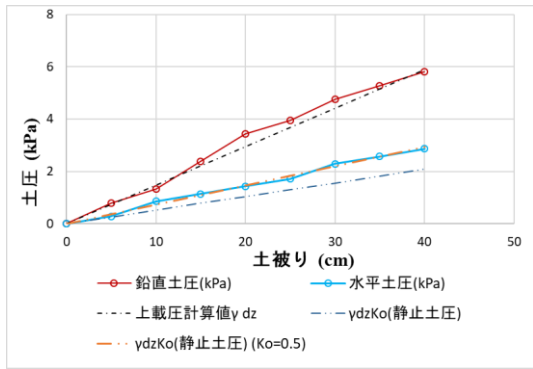


図-2 上載圧・側圧の関係図

土槽内に固定した鉛直用土圧計・水平用土圧計の測定結果を図-2 に示す。鉛直土圧の方が側方土圧より大きいことが分かる。また鉛直土圧については、砂の単位体積重量に地盤深さをかけた γh とほぼ一致している。側方土圧は静止土圧計算値 $\gamma h K_0$ ($K_0 = 1 - \sin \phi$ (Jaky の式)) より、大きくなり、 $K_0 = 0.5$ に近いことがわかる。

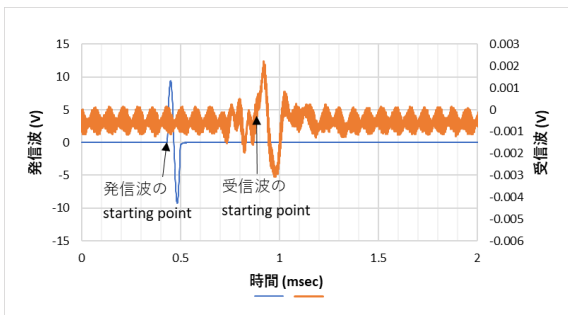


図-3 BE 素子水平向き土被り 400mm

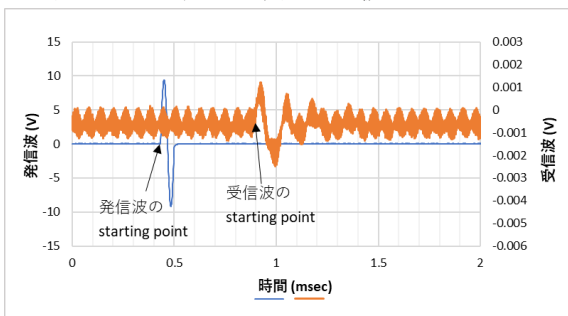


図-4 BE 素子鉛直向き土被り 400mm

発受信の波形を図-3, 4 に示す。受信波形を見ると BE 素子の向きが水平 (図-3) の方が BE 素子の向きが鉛直 (図-4) より電圧が大きくなり、波形がはっきり出ている。また、BE 素子の向きが水平の方が、BE 素子の向きが鉛直の

場合より波の到達時間が短いことが分かる。

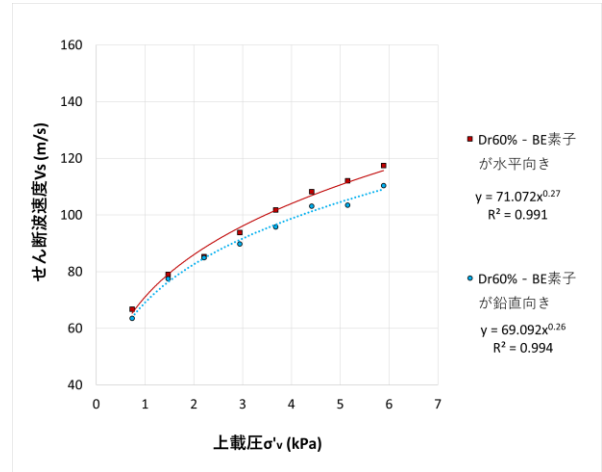


図-5 せん断波速度・上載圧の関係図

図-5 に、せん断波速度 V_s と上載圧の関係を示す。せん断波速度は土被りが大きくなるほど大きくなる傾向が分かる。また、BE 素子の向きが水平の方が BE 素子の向きが鉛直よりせん断波速度が大きいことがわかる。波の振動方向が水平の場合は水平土圧が関係しており、波の振動方向が鉛直の場合は、鉛直土圧が関係するため、このような差が現れたと考えられる。

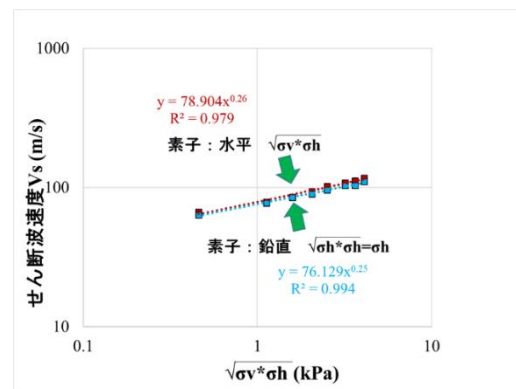


図-6 せん断波速度・上載圧の関係図

図-6 に示すように、鉛直方向の土圧と水平方向の土圧の相乗平均を取ることで、せん断波速度を一義的に決定できることがわかった。

3.2 BE 発信・加速度計受信試験

上載圧が非常に小さい条件において、BE 発信・加速度計受信試験の方が BE 試験より受信側の波が明確に読み取れるメリットがある。BE 試験と BE 発信・加速度計受信試験の元波形

は図-7と図-8に示す。

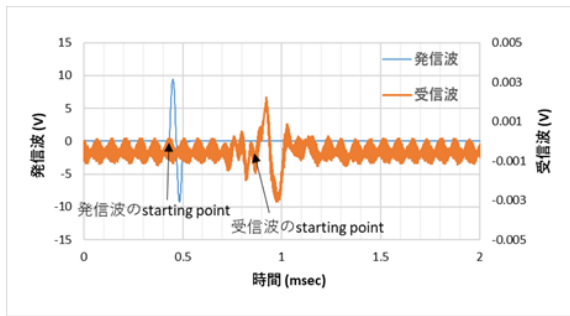


図-7 BE試験の元波形

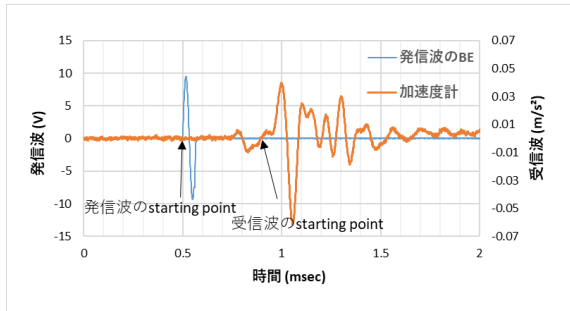


図-8 BE発信・加速度受信試験元波形

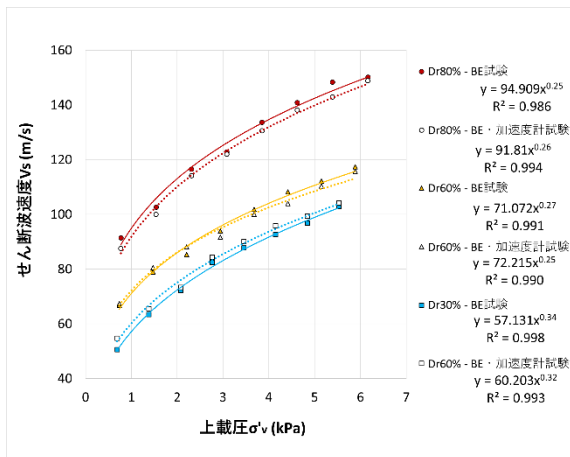


図-9 BE試験とBE発信・加速度受信試験の関係図

通常、せん断波速度は拘束圧の 0.25 乗に比例して大きくなると言われている。図-9 より、低上載圧条件下においても、上載圧の約 0.25 乗に比例して、せん断波速度が大きくなることがわかる。さらに、BE試験とBE・加速度計試験の整合性が得られた。したがって、BE試験の代わりにBE・加速度計試験を使用可能である。

3.3 板叩き試験

板叩き試験とBE試験で得られたせん断波速度が概ね同じ結果が得られた。図-10に板叩き試験とBE試験のせん断波速度の関係を示すが、同じ結果が得られていることがわかる。

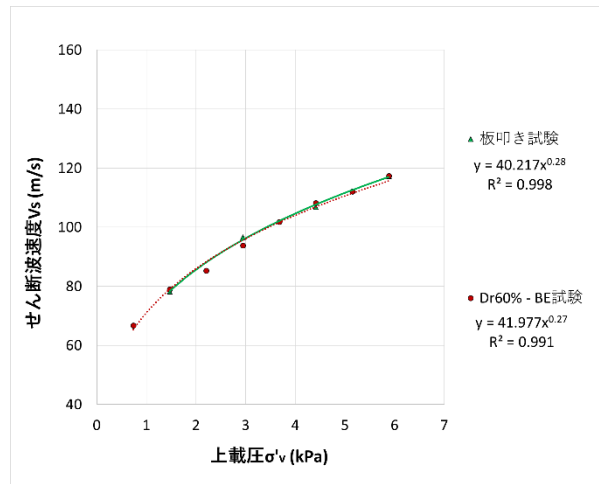


図-10 BE試験-板叩き試験のせん断波速度関係図

4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- ・低拘束圧条件下でも、せん断波速度は拘束圧の 0.25 乗に比例して大きくなる。
- ・せん断波の進行方向が水平で、振動方向が鉛直場合、振動方向が水平の場合より、大きなせん断波速度が得られた。これは、振動方向が水平の場合は、上載圧が関係しており、側方圧より大きいためである。
- ・鉛直方向の土圧と水平方向の土圧の相乗平均を取ることによって、せん断波速度を一義的に決定できることがわかった。
- ・BE試験の代わりに、BE発信・加速度受信試験や板叩き試験でも、同じせん断波速度が得られることがわかった。

【参考文献】

- 1) 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。
- 2) Viggiani, G. and Atkinson, J. H.: Interpretation of bender element tests, *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154, 1995.
- 3) 川口貴之，三田地俊之，澁谷啓，佐野侑房：室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価，*土木学会論文集*，No.694/III-57, pp.195-207, 2001。