

# ベンダーエレメント試験装置系のインパルス応答を用いた受信波形シミュレーション

秋田大学	学生会員	加藤佳介
同上	正会員	荻野俊寛
同上	同上	及川 洋

## 1. はじめに

ベンダーエレメント(以下 BE)試験では送信波として用いる波の波形, 振動数によって受信波形が大きく変化し, 得られるせん断波速度は大きく左右されるという問題がある<sup>1)</sup>. そのため, 適切なせん断波速度を得るためには送信波の波形, 振動数を適切に設定する必要があるが, どのような送信波を用いるのが適切かはいまだ統一的な見解が見られていない. 本研究は BE 試験装置をひとつの線形系とみなすことで, 実験から得られたインパルス応答を用いて, 室内弾性波試験の任意の送信波に対する受信波形を数値計算によってシミュレートすることを目的とする. このシミュレーションによって, 実験で求めたひとつのインパルス応答から, その状態においてあらゆる送信波を送信した場合の受信波形を検証することができる. そのため, 適切な伝播時間を求めるため様々な波形・振動数の送信波に対する受信波形が多数必要となる BE 試験では特に有効である.

## 2. 実験概要

実験には, BE を組込んだ圧密容器を用いている. 供試体には, 秋田泥炭, 豊浦砂 ( $D_r=80.22\%$ ), NSF 粘土を使用した. 所定の圧密応力(秋田泥炭  $\sigma_v=20,40,60,80,100\text{kPa}$ , 豊浦砂  $\sigma_v=20,40,60,80,100,300\text{kPa}$ , NSF 粘土  $\sigma_v=20,50,100,150,300\text{kPa}$ )で段階的に圧密を行い, 各段階で 3t 法により圧密を打ち切ったのち(豊浦砂のみ圧密直後), まず所定の振動数の sin 波を送信波とした BE 試験を行い, 送受信波形の実験値を観測する. 次に時間引き延ばしパルス(TSP)を送信波とした BE 試験<sup>2)</sup>を行い送・受信波形を観測しインパルス応答を同定する. インパルス応答を用いて前述の sin 波を送信波とした場合の受信波形を計算によって求め, 得られた計算値と実験値を比較する.

## 3. インパルス応答の同定および受信波形のシミュレーション

BE 試験はその送信波を入力, 受信波を応答と解釈することによってひとつの線形系とみなすことができる. このとき, インパルスを送信波とした場合の受信波は線形系の特性を支配する関数であるインパルス応答と解釈することができる. インパルス応答は理論上, 任意の入力に対する応答を求めることができるという特徴も持っている. インパルス応答は, TSP を送信した際の受信波に対して, TSP の逆フィルタの畳み込みを行うことで同定することができる. 畳み込み演算がフーリエ変換の積と同値であることを利用して, 式(1)によってインパルス応答  $z(t)$  のフーリエ変換  $Z(f)$  を求め, これを逆フーリエ変換することでインパルス応答を求めている.

$$Z(f) = X_{\text{TSP}}^{-1}(f) \cdot Y(f) \quad (1)$$

ここに,  $X_{\text{TSP}}^{-1}(f)$  は送信波に用いた TSP の逆フィルタのフーリエ変換,  $Y(f)$

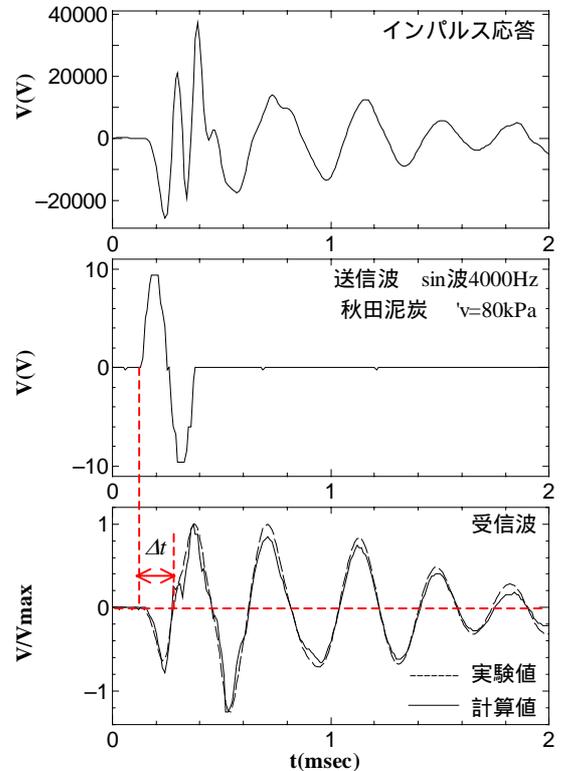


図-1 秋田泥炭のインパルス応答と送受信波形図

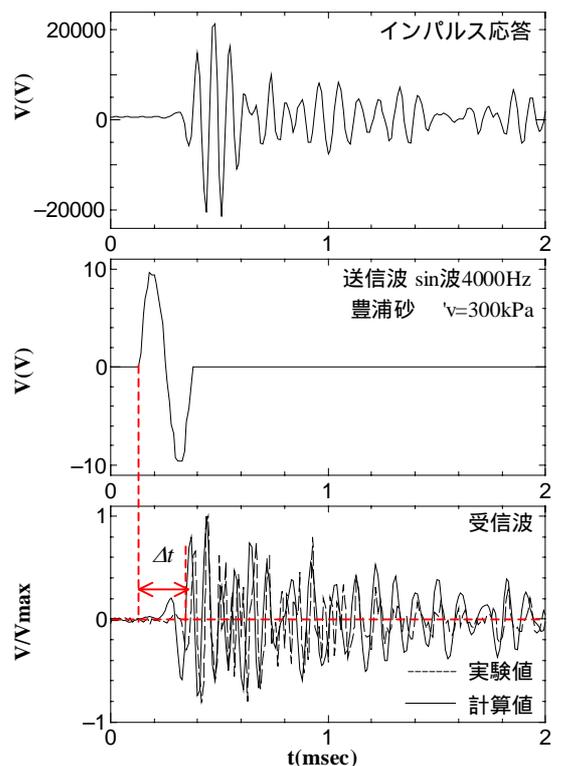


図-2 豊浦砂のインパルス応答と送受信波形図

は TSP を送信波とした際の受信波のフーリエ変換である。

また、式(2)により計算値のフーリエ変換  $Y(f)$  を求め、これを逆フーリエ変換し計算値を得ることで、受信波形のシミュレートを行っている。

$$Y(f) = Z(f) \cdot X(f) \quad (2)$$

ここに、 $X(f)$  は送信波に用いる任意の波形のフーリエ変換である。

#### 4. 実験結果および考察

図-1~図-3 は、各供試体における BE 試験によって得られた代表的なインパルス応答と送・受信波形を示している。図-1 は秋田泥炭、 $\sigma_v=80\text{kPa}$  の場合について、図-2 は豊浦砂、 $\sigma_v=300\text{kPa}$  の場合について、図-3 は NSF 粘土、 $\sigma_v=50\text{kPa}$  の場合について示している。またこれらの図において、上段は式(1)から求めたインパルス応答、中段は任意の送信波形、下段は任意の送信波に対する受信波形を、実験値と計算値をそれぞれ正規化、拡大し重ね合わせたものを示している。供試体に秋田泥炭、NSF 粘土の場合、実験から得られた受信波形と式(2)によって求めた計算値はほぼ一致しており、本報告の手法によって高い精度で受信波形がシミュレートされていることがわかる。また図に示した実験結果以外についても各圧密応力、各振動数における受信波形の比較を行ったところ、概ね一致するという結果を得ている。一方、豊浦砂を供試体として受信波形を比較した場合には、秋田泥炭と NSF 粘土ほどの近似が見られなかった。

図-4 は、図-1~図-3 に示す受信波形図から求めたせん断波速度  $V_s$  と  $\sigma_v$  の関係を両対数軸で示しており、実験値による  $V_s$  と計算値による  $V_s$  を比較している。なお、 $V_s$  は式(3)で計算している。

$$V_s = \frac{l}{\Delta t} \quad (3)$$

$l$  は BE 先端間の距離、 $\Delta t$  は図-1~図-3 に示す方法で求めたせん断波の伝播時間である。

振動数 4000Hz の sin 波を用いた場合の  $V_s$  を比較すると、実験値と計算値の一致度が高い秋田泥炭、NSF 粘土の場合  $V_s$  の差は小さく、一致度の低い豊浦砂の場合  $V_s$  の差は大きいということがわかる。実際には、秋田泥炭で計算値は実験値に対し最大で 5% ほど、豊浦砂で最大 16% ほど、NSF 粘土で最大 30% ほどの誤差が生じている。また図より、特に  $\sigma_v$  の小さい場合、 $V_s$  の差が小さいことがわかる。

#### 5. 結論

本研究から得られた知見は以下の通りである。

1. インパルス応答により受信波形をシミュレートした結果、秋田泥炭、NSF 粘土の場合、受信波形の実験値と計算値は近似しており、本研究で示す手法において受信波形がシミュレート可能であることを示した。豊浦砂の場合、秋田泥炭、NSF 粘土に比べ受信波形の差は大きかった。
2. 受信波の実験値および計算値から  $V_s$  を求め比較した結果、秋田泥炭では  $V_s$  はほぼ一致していた。しかし、用いる試料や送信波の振動数などの条件によっては実験値と計算値との差から  $V_s$  に差が生じる場合もあることを示した。

#### 【参考文献】

- 1) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷 啓, 佐野侏房: 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/ -57, pp. 195-207, 2001.
- 2) 荻野俊寛, 及川 洋, 対馬雅己: 時間引き延ばしパルスを用いた泥炭のベンダーエレメント試験, 平成 17 年度土木学会東北支部技術研究発表会, -19, pp. 436-437, 2006.

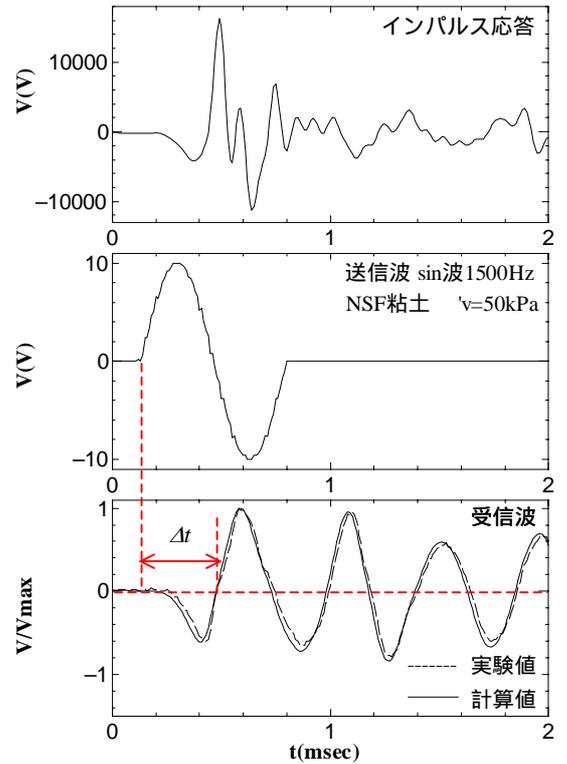


図-3 NSF 粘土のインパルス応答と送受信波形図

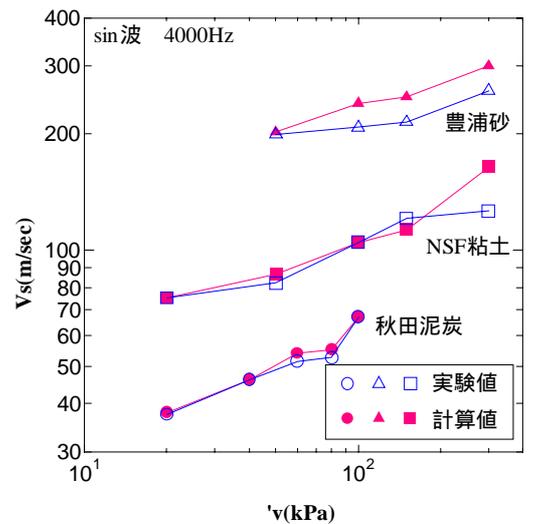


図-4 各供試体における  $V_s$  の比較